INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Ministério da Educação
BRASIL UM PAÍS DE TODOS GOVERNO FEDERAL

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

MODALIDADE PROFISSIONAL

ESTUDO DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO BAIXO CURSO DO RIO MACAÉ UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

JOSÉ HENRIQUES DA SILVA TAVARES

Relatório da dissertação na linha de Avaliação e Gestão Ambiental, na área temática de Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos: diagnósticos e proposições.

Orientação: D. Sc. Jader Lugon Junior e D. Sc. Maria Inês Paes Ferreira.

Macaé/RJ
2011

JOSÉ HENRIQUES DA SILVA TAVARES

ESTUDO DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO BAIXO CURSO DO RIO MACAÉ UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

Relatório da dissertação na linha de Avaliação e Gestão Ambiental, na área temática de Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos: diagnósticos e proposições.

Orientador: D. Sc**.** Jader Lugon Junior
Co-Orientadora: D. Sc. Maria Inês Paes Ferreira.

Macaé/RJ

Dados de Catalogação na Publicação (CIP)

T231e Tavares, José Henriques Silva da.
Estudo de disponibilidade hídrica do baixo curso do Rio Macaé-RJ utilizando modelagem computacional/José Henriques da Silva Tavares – Macaé (RJ): [s.n.], 2011.
59 f.; il.

Orientador: Jader Lugon Junior.
Co-orientadora: Maria Inês Paes Ferreira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.*Campus*-Macaé .Macaé , RJ, 2011.
Bibliografia: f. 55 – 59.

1. Recursos hídricos – Severina – Macaé RJ, Rio, Bacia. 2. Meio ambiente.3.Gestão ambiental .4.Proteção ambiental - Macaé [RJ] - Brasil 5. Batimetria.6. MOHID [Programa de Computador]. I. Lugon Jr, Jader Lugon Junior **orient**. II. Ferreira, Maria Inês Paes. **co-orient**. III.Título.

CDD – 363.7

Dissertação intitulada Estudo de disponibilidade hídrica do baixo curso do rio Macaé utilizando modelagem computacional e 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, linha de pesquisa Avaliação e Gestão Ambiental, na área temática de Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos: diagnóstico e proposições do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovada em .....

Banca Examinadora:

.....
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.

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

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

AGRADECIMENTOS

A todos que me apoiaram e contribuíram de alguma forma na construção do conhecimento necessário para escrever esta dissertação.

À PETROBRAS, em especial ao Gerente Geral da Unidade de Operações de Exploração e Produção da Bacia de Campos – UO-BC o Engenheiro de Petróleo Sênior José Airton de Lacerda Martins e ao também Engenheiro de Petróleo Sênior Ivan Garcia dos Santos que viabilizaram a minha participação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Mestrado em Engenharia Ambiental na Modalidade Profissional.

Ao meu orientador e Professor Jader Lugon Junior e a minha co-orientadora Maria Inês Paes Ferreira pelos ensinamentos, dedicação, perseverança, confiança e também pela ajuda incondicional nos momentos de maiores dificuldades para dar continuidade ao projeto.

À equipe do NUPERN-IFF pelo total apoio no desenvolvimento da modelagem computacional.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental José Augusto Ferreira da Silva pelo zelo ao fiel cumprimento das normas acadêmicas para a composição e estruturação gráfica da qualificação e da dissertação.

RESUMO

Atualmente as pressões sobre o meio ambiente vem se intensificando a cada dia, trazendo ameaças e degradação ao ambiente cênico e as diversas formas de vida. Essa situação tem levantado discussões nos campos científico, político, social e econômico do Brasil e do mundo. Todas essas preocupações com a água seja com a sua disponibilidade ou mesmo com sua degradação, sinalizam que ações de caráter urgente deverão ser tomadas voltadas a preservação, conservação e recuperação deste importante recurso para a humanidade, ou seja, para a própria sobrevivência do homem.

Apesar dos múltiplos e essenciais usos das águas, sua inadequada gestão pode propiciar situações de redução de disponibilidade hídrica ou mesmo de escassez. Nesse sentido há carência de estudos regionais que possam subsidiar planos diretores de recursos hídricos de importantes mananciais existentes no Estado do Rio de Janeiro, com vistas a garantir o equilíbrio entre as disponibilidades e as demandas futuras dos recursos hídricos (em quantidade e qualidade). Configurado tal cenário, o presente estudo utiliza modelagem computacional (MOHID - Water Modelling System) como ferramenta para gerar prognósticos aplicáveis ao estudo de conflitos de uso da água, ora dados em razão de demandas quantitativas, ora por demandas qualitativas. O modelo foi desenvolvido para simulações na Bacia Hidrográfica do Rio Macaé (Macaé, Rio de Janeiro, Região Hidrográfica VIII (RIO DE JANEIRO, 2006), de seu estuário à região de Severina, onde se localizam as principais captações de industriais (abastecimento de plataformas de produção e exploração de petróleo *offshore* da Bacia de Campos e de água de resfriamento para Termoelétricas) e de abastecimento público.

A região do estudo (baixo curso do rio Macaé) está localizada no litoral Norte Fluminense e sofre o impacto de toda a bacia hidrográfica. A bacia apresenta dois aproveitamentos hidrelétricos, na sub-bacia do rio São Pedro pela UHE Macabu e UHE de Glicério atualmente desativada, No baixo curso do rio Macaé estão instaladas duas usinas termelétricas, a UTE Mário Lago e a UTE Norte Fluminense que recentemente foram incorporadas ao patrimônio da PETROBRAS.

O presente trabalho visa, através da modelagem computacional, criar diversos cenários e simular através do programa MOHID (Water Modelling System) variáveis de batimetria e fluviometria que podem alterar a disponibilidade hídrica no ponto de captação de água para uso industrial e abastecimento público na localidade de Severina em Macaé-RJ.

Palavras-chave: Modelagem Computacional. MOHID. Baixo curso do Rio Macaé. Disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Nowadays the pressures on the environment is intensifying every day, bringing threats and degradation to the environment scenic and diverse forms of life. This situation has raised debate in the scientific field, political, social and economic development of Brazil and the world. All these concerns with the water, either with their availability or even their degradation, indicate that urgent actions should be taken aimed at preservation, conservation and recovery of this important resource for humanity, that is, to the man survival.

Despite the multiple and essential uses of water, its inadequate management situations can provide reduction of watery availability or scarcity. In this sense there is a lack of studies that can support regional master plans for watery resources in major wellsprings in the State of Rio de Janeiro, in order to ensure a balance between cash and future demands of watery resources (quantity and quality). Configured a scenario, this study uses computational modeling (MOHID - Water Modelling System) as a modeling appliance to generate apply prognostic for the consideration to the study of water conflicts, sometimes due to data demands quantitative, qualitative demands prays for. The simulation model was adapted to the Macaé hydrographic Basin (Macaé, Rio de Janeiro, Hydrographic Region VIII (RIO DE JANEIRO, 2006), of the estuary region Severina, where are located the main industrial reception (Offshore Production and Exploration platforms in the Campos Basin and water for thermoelectric cooling) and water supplies.

The region of study (lower drift of the Macaé River) is located on the northern coast Fluminense and suffers the impact of all hydrographic basin. The basin has two hydroelectric projects, in the sub-basin of the São Pedro River for the Macabu hydroelectric power station and Glicério hydroelectric power station, in fact disabled. In the lower drift of the Macaé river are installed two thermoelectric power plants, the thermoelectric power plants Mario Lago and Norte Fluminense, which has recently been incorporated into patrimony of PETROBRAS.

The present study aims, through computational modeling, create and simulate various scenarios through the MOHID program (Water Modelling System) variable bathymetry and fluviometric that can alter the availability of water at the point of abstraction of water for industrial use and public supply in the locality of Severina in Macaé-RJ.

Keywords: Computational Modeling. MOHID. Lower drift of Macaé river.
Watery Availability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Figura 1 - Ilustração das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro.....11

FIGURA 2. Mapa hidrográfico referenciando a região de estudo antes da retilinização..... 12

FIGURA 3. Recepção de água na estação de captação de água da Severina.....14

FIGURA 4. Vista da na estação de captação de água da Severina (ECA).....15

FIGURA 5. Vista da sala de bombas na estação de captação de água da Severina.....15

FIGURA 6. Imagem Georeferenciada.....25

FIGURA 7. Polígonos de terra.....25

FIGURA 8. Pontos de batimetria.....25

FIGURA 9. Grade para discretização do espaço..... 25

FIGURA 10. Representação esquemática do MOHID, um programa tridimensional numérico para simular massas de águas superficiais (oceanos, os estuários, reservatórios e outros).....29

FIGURA 11. Mapa hidrográfico referenciando a região de estudo antes da retilinização.....37

FIGURA 12. Mapa de localização da Bacia do Rio Macaé (RJ) 37

FIGURA 13. Vista aérea dos rios São Pedro e Macaé.....38

FIGURA 14. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a situação atual do rio Macaé.....38

FIGURA 15. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 1, estreitamento do rio Macaé a jusante da captação.....39

FIGURA 16. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 2, estreitamento de 500 metros do rio Macaé.....39

FIGURA 17. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 4, alargamento do rio Macaé. 40

FIGURA 18. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 5, criação de meandros.....41

FIGURA 19. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 6, estreitamento e retirada de areia.....41

FIGURA 20. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 7, retirada de areia próximo à foz do rio Macaé.....42

FIGURA 21. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a situação atual do rio Macaé. 48

FIGURA 22. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 1, estreitamento do rio Macaé a jusante da captação. 48

FIGURA 23. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 2, estreitamento de 500 metros do rio Macaé. 49

FIGURA 24. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 4, alargamento do rio Macaé.....49

FIGURA 25. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 5, criação de meandros 50

FIGURA 26. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 6, o estreitamento e retirada de areia. 50

FIGURA 27. Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 7, retirada de areia próximo à foz do rio Macaé.....51

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. Gráfico de Schroeder Fazenda Oratório-Macaé-RJ (1995 -2005.....20

GRÁFICO 2. Total pluviométrico de 1995 a 2005.....21

GRÁFICO 3. Vazão média do Rio Macaé na estação de Severina durante a estação de inverno.....21

GRÁFICO 4. Gráfico consolidado de todas as simulações feitas no rio.....42

GRÁFICO 5. Consolidação dos dados das simulações.....47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....10

1.1 Justificativa/Relevância da proposta.....15

1.2 Objetivos.....16

1.2.1 Objetivo geral.....16

1.2.2 Objetivos específicos.....16

2 REVISÃO DA LITERATURA.....17

2.1 Disponibilidade hídrica – fatores determinantes e questões legais.....17

2.1.1 Comportamento pluviométrico na região de estudo.....20

2.2 Modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento dos recursos hídricos 22

2.3 Parâmetros empregados na modelagem aplicada aos baixo-médio cursos do Rio Macaé.26

2.4 Referencial teórico e fundamentação 27

3 ARTIGO CIENTÍFICO.....30

4 RESULTADOS.....47

5 CONCLUSÃO.....52

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

1. INTRODUÇÃO

A quantidade de água livre sobre o planeta Terra atinge cerca de 1.370 milhões km3, o que corresponderia a uma camada imaginária com média de 2.700 m de espessura sobre toda a superfície terrestre (MANSAN, 2004). Por possuir uma distribuição pouco eqüitativa entre as diferentes fases (sólido-líquido-gasoso; salgada-salobra-doce), a disponibilidade hídrica também não é homogênea no globo, havendo regiões de abundância de recursos hídricos em áreas tropicais e outras de escassez em áreas temperadas (MARGALEF, 1983). Além destes fatores, a deterioração da qualidade da água dos aquíferos superficiais e subterrâneos surge como um dos principais desafios a serem vencidos pelas populações humanas para a garantia de um desenvolvimento sustentável, compatível com a crescente demanda por este recurso natural. Cabe lembrar que conforme definido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas para discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental é que desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Não obstante, a falta de preservação das principais cabeceiras e nascentes de rios que originam, à jusante, as grandes bacias hidrográficas, associada à carência de estudos que possam subsidiar planos diretores de recursos hídricos adequados para os importantes mananciais, também podem ser apontados como pontos críticos a serem atacados para garantia de um equilíbrio entre as disponibilidades e as demandas futuras dos recursos hídricos (em quantidade e qualidade). Também se faz necessária a identificação de conflitos potenciais, estes últimos relativos à análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução das atividades produtivas e de modificações dos padrões de uso e ocupação da terra (BRASIL, 1997).

Por se tratar de um recurso natural limitado, dotado de valor econômico, a água é considerada um bem essencial à vida e um dos principais insumos no processo de produção de mercadorias. A disponibilidade de água em rios, lagos e aqüíferos depende de diversos aspectos relacionados, entre outros, ao clima, ao relevo e à geologia da região; e deve atender aos usos múltiplos na bacia, que são: abastecimento para população, abastecimento de indústrias, conservação do ecossistema, criação de animais, diluição de águas residuais, calado para navegação, irrigação de áreas agrícolas, aqüicultura, produção de energia através de hidrelétricas, recreação e turismo (MATOS e ZOBY, 2004).

O objeto de estudo do projeto de pesquisa ora apresentado é a Bacia Hidrográfica do Rio Macaé. O Rio Macaé, chamado antigamente de Rio dos Bagres, nasce nas escarpas da Serra do Mar, mais precisamente em sua vertente Atlântica, na Serra de Macaé de Cima, região de Nova Friburgo – RJ. Nasce a aproximadamente 1560 metros de altitude, próximo ao Pico do Tinguá, local de acentuadas declividades. Suas águas são avolumadas pelos diversos tributários que fazem parte de sua bacia na margem esquerda, como o Rio Sana, Rio do Ouriço, Rio d'Anta, Córrego Atalaia, Córrego do Ouro, Rio São Pedro. Pela margem direita temos os Rios Bonito, Purgatório, Pedrinhas e outros (MACAÉ, 2001). A Bacia Hidrográfica do Rio Macaé integra a Região Hidrográfica VIII do Estado do Rio de Janeiro (RH-VIII), juntamente com as bacias hidrográficas do Rio das Ostras e da Lagoa de Imboassica (conforme ilustrado na Figura 1).

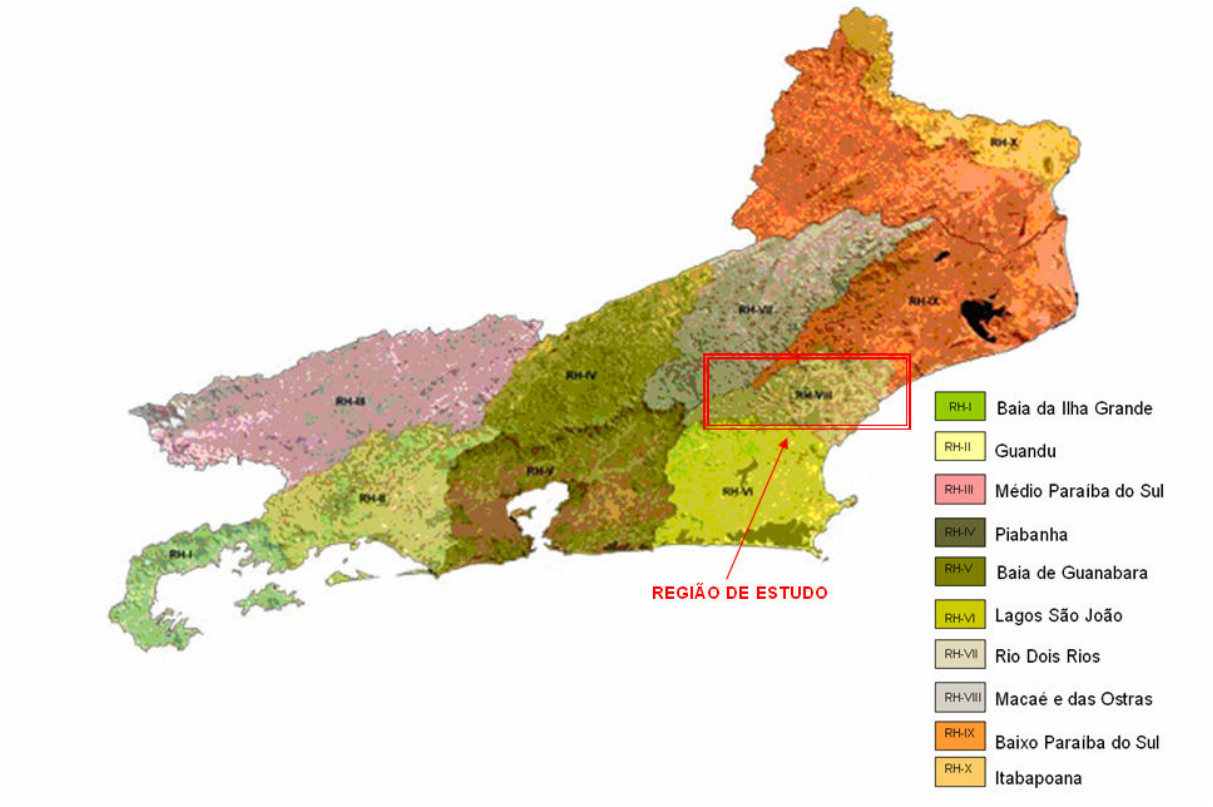

Figura 1 - Ilustração das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro – Resolução CERHI n. 18/06. Fonte: SERLA (2008b). Adaptação própria.

As condições particulares da Bacia do Médio e Baixo Rio Macaé, localizada na Baixada Fluminense tem levado, há muito tempo, à realização de obras hidráulicas visando especialmente drenagem e irrigação. Assim, numerosos canais foram abertos e cursos d´água retilinizados na região, inclusive com a canalização do próprio rio principal, em uma extensão

de mais de 7 km. A maioria destas obras foi realizada pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), até meados de 1980.

Para o projeto destas obras, e mais tarde, visando o aproveitamento energético das águas da bacia, houve necessidade de conhecimento dos regimes de precipitações e de escoamento dos seus cursos d´água da bacia. Assim, desde os longínquos anos da década de 30, do século passado, foram implantados numerosos postos pluvio e fluviométricos na região, sobretudo pelo DNOS, e realizadas inúmeras medições de descarga (PLANAGUA, 2001).

A figura abaixo mostra como era a configuração natural antes do rio ser retilinizado pelo DNOS.

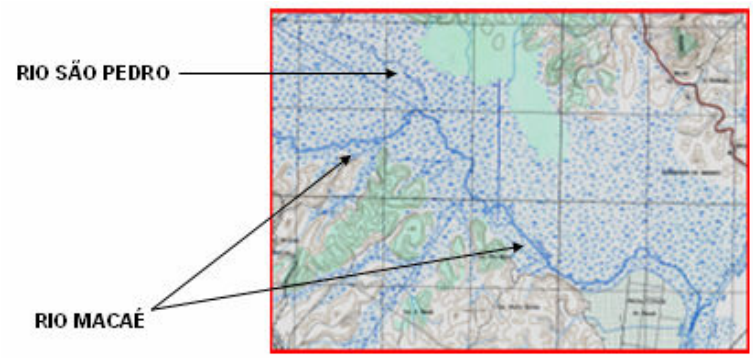

Figura 2 - Mapa hidrográfico referenciando a região de estudo antes da retilinização.
Fonte: Fundação IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia. Folha SF-24-Y-A-I-3.
Publicação autorizada pelo IBGE conforme protocolo nº 58473/2011 de 21/10/2011.
Mapa completo em anexo.

Muitos destes postos tiveram curta duração de operação, por terem servido a estudos específicos. Outros, que constituíam a rede básica do Departamento, foram abandonados depois de muitos anos de observação. O Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e a Agência Nacional de Águas (ANA), porém mantiveram seus dados nos arquivos, possibilitando a utilização dos registros antigos (PLANAGUA, 2001). Embora a equipe do Projeto PLANAGUA (2001) afirme haver**,** na Bacia do Rio Macaé, em atividade, 74 postos pluviométricos e 4 postos fluviométricos - sendo 3 destes últimos operados pelo Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM) e um instalado no ano de 2000 na Severina, operado pela Usina Termelétrica Norte Fluminense (UTE Norte Fluminense) - Benassuly (2009), ao sistematizar levantamento concernente às suas pesquisas, consolida dados mais recentes, informando que existem, atualmente, na bacia do Rio Macaé, 19 estações fluviométricas - das quais somente 5 encontram-se em operação. São elas: Macaé de Cima, Galdinópolis, Piller, UHE Macabu – jusante e Glicério (PCH), cuja

numeração adotada pela ANA para identificar estas respectivas são: 59120000, 59125000, 59135000, 59139500, 59142000, Das 19 estações pluviométricas, das quais encontram-se em operação 8 (Usina Quissamã, Macabuzinho, Faz. Oratório, Leitão da Cunha, Maria Mendonça, Piller, Galdinópolis e Faz. São João), cuja numeração adotada para identificação pela ANA são respectivamente: 02241002, 02241003, 02241004, 02242001, 02242002, 02242003, 02242004 e 02242005. Acerca do desempenho das redes de monitoramento, de dados tanto pluvio quanto fluviométricos, Duarte *et al.* (2010), sinalizam a necessidade de se repensar a localização dos pontos de monitoramento dos médio e baixo cursos da bacia em estudo, e de integrar os dados dos pontos existentes no alto curso entre si, e com os do baixo curso para que não haja dificuldades a mais no planejamento das ações de gestão a serem apontadas no Plano de Bacia. Deste modo, pode-se entender que as redes de monitoramento, apesar de operantes, ainda apresentam fragilidades, mas que estas têm condições de serem supridas (por exemplo, através da reativação e/ou a construção de estações de monitoramento em locais estratégicos).

A bacia do rio Macaé está inserida em quase sua totalidade na Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, e é considerada como uma das principais contribuintes hídricas dos mananciais superficiais da região Sudeste. Suas águas apresentam usos múltiplos, com destaque para a agricultura, os abastecimentos público e industrial, incluindo a geração de energia elétrica através de usinas termoelétricas, e o abastecimento de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo e gás em toda Bacia de Campos. Infelizmente, no entanto, nos últimos anos, esta região vem sendo sistematicamente agredida por desmatamentos, queimadas, obras impactantes nas margens dos rios, com terraplanagens e corte de encostas, que aumentam os processos erosivos e de assoreamento dos cursos d'água (MELLO, 2004).

A Bacia vem sendo investigada por diversos pesquisadores, entre eles, Guerra e Marçal (2006), relativamente ao estudo de Unidades de Paisagem (UPs), Rodrigues (2008), que estudou modelos matemáticos de dispersão de poluentes e por Benassuly (2009), que avaliou as redes de monitoramento existentes na bacia; porém, apenas Pinheiro (2008) estudou sistematicamente sua qualidade de água com vistas ao enquadramento do corpo hídrico. Como sub-bacias principais destacam-se as bacias dos rios Sana e São Pedro (FERREIRA *et al*., 2008; MARÇAL, 2010).

As atividades de uso consuntivo da água na bacia do rio Macaé incluem a irrigação, o abastecimento urbano, o abastecimento rural, a criação de animais e o abastecimento industrial. A captação da água para uso da PETROBRAS ocorre no rio Macaé,

especificamente na localidade da fazenda Severina (Fotos 1, 2 e 3), distante 20 km da sede de Imbetiba.

A estação possui as seguintes, características:

- ✓ Adução natural através de comportas para poço.
- ✓ Captação através de bombas para poço.
- ✓ Recalque para Reservatório Intermediário, tanque 1.
- ✓ Transporte da água do tanque 1 até a Estação de Tratamento na sede da Empresa em Imbetiba, por gravidade.
- ✓ Operação 24 h/dia;
- ✓ Elevatória capaz de bombear 350 m^3/h para a Base de Imbetiba e 250 m^3/h para a Base da Transpetro em Cabiúnas;
- ✓ Transferência mensal de 180.000 m^3;
- ✓ Capacidade de armazenamento de água bruta de 1.560 m^3 no tanque 1 e 2300 m^3 no tanque 3 em Imbetiba ;
- ✓ Outorga, junto a SERLA, no valor de 792 m^3/h, conforme Decreto nº 27.462 de 28 de novembro de 2000, do Rio de Janeiro.
- ✓ Licença de operação junto ao INEA;
- ✓ Controle de vazão ponto a ponto;
- ✓ Monitoramento da qualidade de água realizado segundo os parâmetros da Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 1997).

A figura 3 mostra as instalações onde se encontram as bombas de recalque da água bruta captada no rio Macaé na Severina e enviada para a estação de tratamento de água em Imbetiba.

Figura 3 - Recepção de água na estação de captação de água da Severina.
Fonte: PETROBRAS (2003).

Figura 4 - Vista da na estação de captação de água da Severina (ECA).
Fonte: PETROBRAS (2003).

As figuras 3 e 4 mostram as instalações onde se encontram as bombas de recalque da água bruta captada no rio Macaé na Severina e enviada para a estação de tratamento de água em Imbetiba**.**

Figura 5 - Vista da sala de bombas na estação de captação de água da Severina.
Fonte: PETROBRAS (2003).

Na figura 5 observa-se o painel de controle e outros acessórios da sala de bombas em Severina responsável pela água bruta que chega à estação de tratamento em Imbetiba.

1.1 Justificativa e Relevância da proposta

A água é fundamental para as atividades de prospecção e exploração de petróleo da PETROBRAS e de outras empresas produtoras. Ciente desta necessidade, a PETROBRAS possui uma estação de captação de água na Severina, que bombeia em média 792,00 m^3/h de água, que representa 100% da outorga concedida pelo INEA através do Decreto nº 27.462 de 28 de novembro de 2000, do Rio de Janeiro, para uma estação de tratamento própria, localizada no bairro de Imbetiba, Macaé-RJ. A empresa mantém esta estação para que não dependa do fornecimento de água da empresa pública de abastecimento (Companhia Estadual de Água e Esgoto – CEDAE), pois uma interrupção no fornecimento de água poderia causar sérios transtornos à produção de petróleo e gás do país. Cabe ressaltar que a quantidade de

água bombeada é bastante representativa em relação à quantidade de água bombeada pala CEDAE (3074,40 m^3/h) (PINHEIRO, 2008). Assim é de extrema relevância o estabelecimento de cenários que possam nortear o Organismo de Bacia da região (CBH Macaé e Rio das Ostras) na proposição de alternativas de intervenção que visem a garantia da disponibilidade hídrica da bacia em estudo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto é realizar a simulação das alterações antrópicas e naturais (batimetria e fluviometria do rio) à montante da estação de captação de água da PETROBRAS, utilizando modelagem computacional como ferramenta para gerar um modelo de prognóstico das variações fluviométricas no médio-baixo curso da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, até o ponto de captação da Estação Severina.

1.2.2 Objetivos específicos

i) Simular, com o auxílio de um programa de modelagem computacional (MOHID), as variações de batimetria e fluviometria, na porção compreendida entre a confluência dos rios Macaé e São Pedro, até a estação de captação de água da Severina, no Rio Macaé;
ii) Por intermédio dos resultados da modelagem obtida, gerar um padrão de simulação das prováveis variações hidrológicas nesta porção do Rio Macaé, de forma a contribuir com a gestão dos usos múltiplos das águas desta bacia, notadamente quanto a sua captação e o seu fornecimento para usos consuntivos e não consuntivos;
iii) Sugerir medidas preventivas para superar futuros problemas como baixo nível fluviométrico, assoreamento e eutrofização, entre outros, na captação de água da estação de Severina, passíveis de comprometer o abastecimento de água na Bacia de Campos;
iv) Subsidiar o órgão estadual gestor de recursos hídricos e as representações do Comitê de Bacia dos Rios Macaé e das Ostras (CBH Macaé e das Ostras) no estabelecimento de cenários de disponibilidade hídrica da região em estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Disponibilidade hídrica – fatores determinantes e questões legais

Uma bacia hidrográfica é considerada a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Considerando ainda que faz parte dos objetivos da PNRH assegurar às atuais e futuras gerações a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, bem como a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais, torna-se imperativo a caracterização e o diagnóstico do uso e da ocupação do solo e dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, notadamente em suas porções à montante.

Por meio do material particulado em suspensão e das substâncias dissolvidas advindas de suas bacias de drenagem, os rios atuam como integradores dos processos naturais e/ou antrópicos ao longo do sistema hídrico (BERNER e BERNER, 1996). O transporte de macro e micro nutrientes ao longo da bacia de drenagem está fortemente associado à dispersão do material dissolvido e particulado em suspensão, que é geralmente um dos componentes de uma função de diversas variáveis, tais como: condições hidráulicas; processos de mistura de sedimentos contaminados e não contaminados; coagulação, deposição e estocagem nas planícies de inundação, substrato fluvial, lagos, represas, e estuários; distribuição de partículas de acordo com tamanho e densidade, por exemplo (FOSTER e CHARLESWORTH, 1996; MILLER, 1997; CARROL *et al.*, 2000).

No Brasil, até 1920, à exceção das secas do Nordeste, a água não representou problemas ou limitações. A cultura da abundância atualmente prevalecente teve origem nesse período. Ao longo da década de 70, e mais acentuadamente na de 80, a sociedade começou a despertar para as ameaças a que estaria sujeita se não mudasse de comportamento quanto ao uso e à manutenção da qualidade de seus recursos hídricos (BARCELLOS *et al.*, 2006). Por ser a água um solvente versátil, os corpos hídricos, notadamente de ambientes lóticos, freqüentemente vem sendo usados para transportar produtos residuais para longe do local de produção e descarga, funcionando como locais de disposição final de efluentes. Infelizmente, os produtos residuais transportados são freqüentemente tóxicos, e sua presença pode degradar seriamente o ambiente do rio, lago ou riacho receptor (WHITE e RASMUSSEN, 1998). Além das questões relacionadas ao lançamento direto de efluentes, sem tratamento, em corpos

hídricos receptores, a rápida urbanização concentrou populações em locais carentes de serviços essenciais de saneamento. Isto contribuiu para gerar poluição concentrada e sérios problemas de drenagem agravados pela inadequada deposição de lixo, pelo assoreamento dos corpos d'água e/ou pela conseqüente diminuição das velocidades de escoamento das águas (MORAES, JORDÃO, 2002).

Devido ao fato dos corpos hídricos superficiais serem os principais responsáveis pelo recebimento final de toda essa carga poluidora, medidas operacionais visando avaliar a melhoria e a conservação da qualidade da água estabelecida para cada corpo de água vem sendo implementadas por força de exigência legal (BRASIL, 1997; 2000a; 2000b; 2005; 2006). Da mesma forma, estudos sobre a avaliação da disponibilidade hídrica para aproveitamentos diversos vem sendo conduzidos, em busca do conhecimento de aspectos vinculados às variações de vazão, pluviometria, tempo de residência da água, curvas de cota *vs* área *vs* volume, etc. (ANA, 2009). Além da qualidade físico-química e microbiológica da água, segundo a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH n°. 12/2000 (BRASIL, 2000), os procedimentos para enquadramento dos corpos hídricos deverão também ser desenvolvidos em conformidade com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia e, no caso, com o **Plano Estadual de Recursos Hídricos** e, se não existirem ou forem insuficientes, com base em estudos específicos propostos e aprovados pelas respectivas instituições competentes do sistema de gerenciamento dos recursos hídricos. Deverão ser observadas as seguintes etapas: (i) diagnóstico do uso e da ocupação da terra e dos recursos hídricos na bacia hidrográfica; (ii) prognóstico do uso e da ocupação do solo e dos recursos hídricos na bacia hidrográfica; (iii) elaboração da proposta de enquadramento; (iv) aprovação da proposta de enquadramento e respectivos atos jurídicos.

De importância singular, destaca-se o trabalho desenvolvido por Pinheiro (2008) que realizou um diagnóstico da bacia hidrográfica do Rio Macaé quanto à situação da qualidade de seus recursos hídricos, e adaptou as informações geradas à linguagem dos decisores, por meio da utilização de um índice de qualidade das águas (IQA), e pela espacialização das informações relativas não só a qualidade e ao uso da água, mas também ao uso e ocupação da terra. Entretanto, em função da complexidade e da dimensão da bacia hidrográfica estudada, compreendendo uma área de drenagem de 1.765 $Km^{2,}$ distribuídos em seis municípios, a autora sugere a realização de um levantamento detalhado dos usos da água em cada trecho, a fim de identificar fontes poluidoras significativas. Recomenda ainda a expansão da rede de monitoramento para sub-bacias e a substituição do IQA, pelo IB (Índice de Balneabilidade) nos pontos onde há recreação de contato primário, otimizando os recursos necessários à

realização de um programa de monitoramento. A autora sugere também a adoção de índices biológicos, notadamente para o alto curso da bacia, onde se observou melhor qualidade da água, envolvendo inclusive as comunidades locais na coleta e interpretação dos dados, fato também apontado por Tavares (2008).

Por sua vez, em relação ao uso e ocupação da terra, pode-se considerar que a retirada da vegetação nativa de encosta, de topo e a movimentação constante do solo para o cultivo acentuam os processos erosivos, favorecidos pela precipitação, pelo vento (fatores de erosão hídrica e eólica respectivamente), pela irrigação e pelo uso de fertilizantes, corretivos de solo e praguicidas. A somatória destes fatores gera instabilidade nos ecossistemas terrestres, com reflexos negativos sobre os ambientes aquáticos. Faz-se necessário então, o trabalho de reposição florestal, respeitando-se a necessidade de plantio da flora nativa da região, como uma das ações prioritárias de proteção para redução do escoamento superficial difuso e a entrada de poluentes e consequentemente a poluição e assoreamento (BRIGANTE; ESPÍNDOLA, 2003).

Além dos aspectos até aqui abordados, o estudo hidrológico, no contexto de bacias hidrográficas, busca conceituar e modelar diferentes processos que interagem sob condições ambientais variáveis no espaço e no tempo (SCHULER, 2003). Uma das formas mais comuns de avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste do desenvolvimento e aplicação de modelos fisicamente baseados com auxílio de técnicas de mapeamento, combinando outros modelos, tais como o CN-SCS (EASTON *et al*., 2008; STACKELBERG *et al*., 2007), o ARNO (COLLISCHONN *et al*., 2007) e o MOHID (WOLANSKI, 2007). Além desses, certos modelos físicos para descrever o comportamento da infiltração e propagação do escoamento (PEREIRA *et al*., 2006; PRUSKI *et al*., 2001) também são empregados, para o que são necessárias séries históricas de precipitação e de evapotranspiração, a fim de simular o comportamento das vazões, a partir de um balanço hídrico, tendo-se determinada camada de solo como controle (RIBEIRO NETO, 2006). Este tipo de investigação científica é altamente aceita, em especial quando técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e sensoriamento remoto são aplicadas para espacializar as variáveis de entrada do modelo, consistindo no estado-da-arte do conhecimento na área de engenharia de água e solo e de recursos hídricos (STACKELBERG *et al*., 2007; MARSIK; WAYLEN, 2006).

Assim, a simulação hidrológica surge como importante ferramenta para a previsão de respostas hidrológicas dessas unidades ambientais a determinado evento de precipitação (SILVA *et al*., 2007). Destaque pode ser dado aos trabalhos de Queiroz e Chaudhry 2005 em

complexo estudo estatístico sobre análise de eventos hidrológicos extremos, e ao trabalho de Silva *et al.* (2007), em estudo sobre modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande.

2.1.1 Comportamento pluviométrico na região de estudo

No gráfico 1, observamos que a estação de inverno possui o menor índice de pluviosidade em conformidade com Hingel *et al.*, 2009.

A distribuição das chuvas no baixo curso bacia não se dá de forma regular. Essa irregularidade também ocorre ao longo do ano, com a concentração da pluviosidade no período de novembro a março (essa concentração agrava o processo de erosão). O gráfico mostra a variabilidade pluviométrica anual numa estação localizada no médio curso do Rio Macaé. Como se pode observar ela possui pluviosidade reduzida no período que se estende desde maio até agosto, sendo que, durante o período de análise o mês mais seco é Junho.

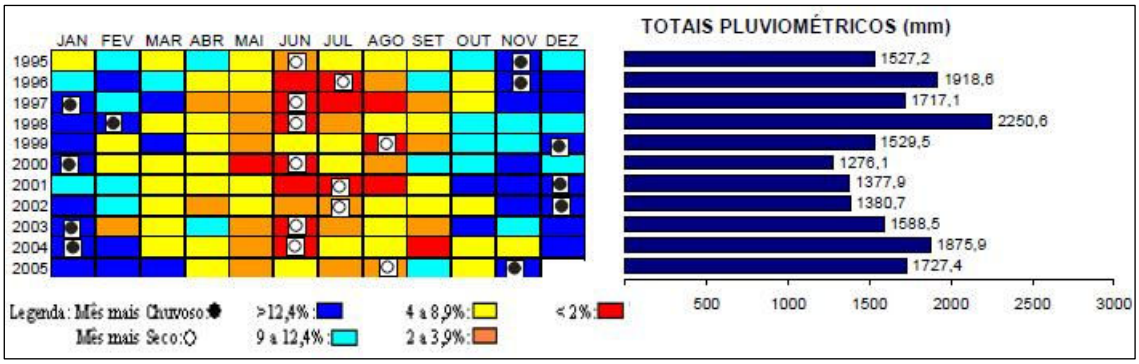

Gráfico 01 – Gráfico de Schroeder Fazenda Oratório-Macaé-RJ (1995 -2005).
Fonte: HINGEL *et al.*, 2009

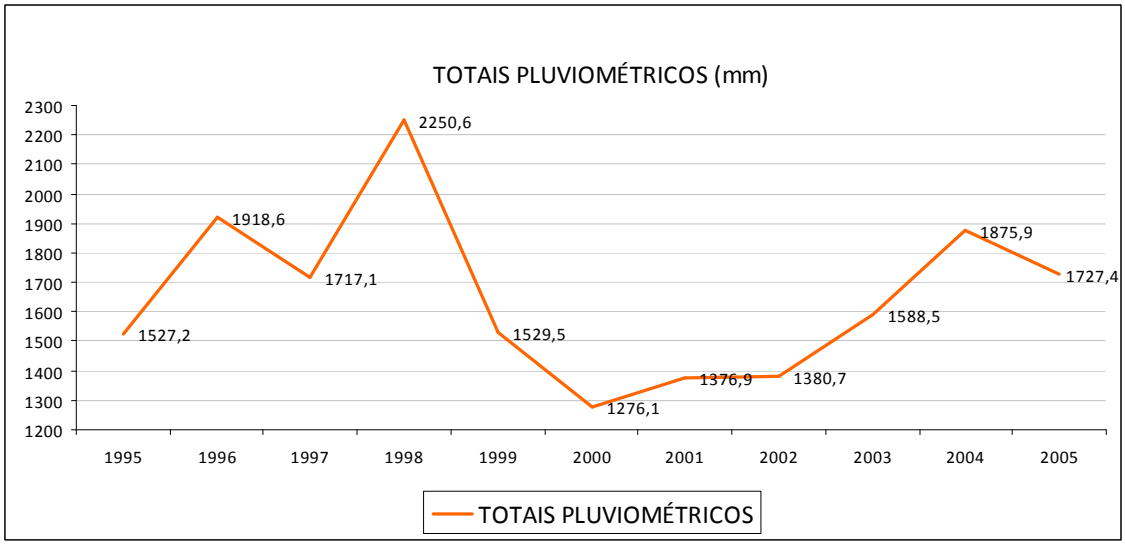

Gráfico 2 - Total pluviométrico de 1995 a 2005.
Fonte: Elaboração própria à partir dos dados do gráfico de Schroeder Fazenda Oratório-Macaé-RJ (1995 -2005), HINGEL *et al*., 2009.

No gráfico abaixo, observamos que os anos de 2000, 2001 e 2002, apresentaram os menores valores de pluviosidade, 1276,1mm, 1376,9mm e 1308,7mm respectivamente e que a variação da vazão durante os 10 anos estudados sofre alterações apreciáveis, tendo como média mínima 6,35m^3/s e média máxima de 14,65m^3/s, ou seja, uma variação de 2,3 vezes (mais que o dobro da vazão média mínima).

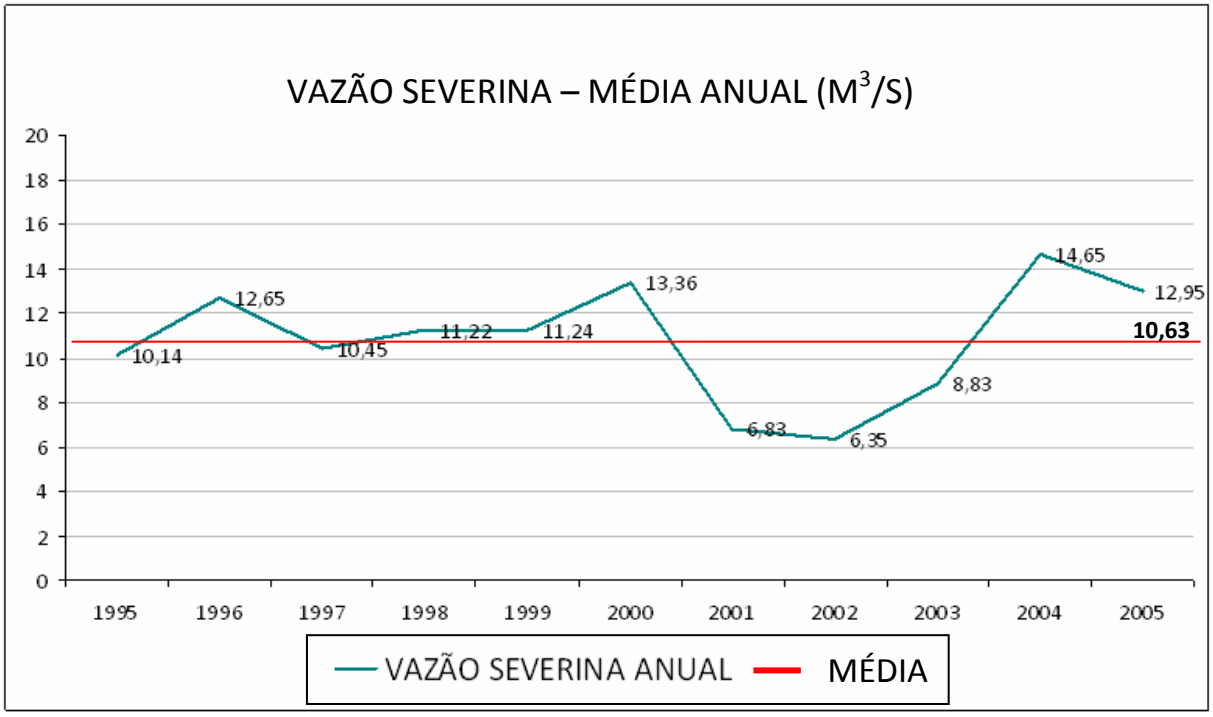

Gráfico 03 - Vazão média do Rio Macaé na estação de Severina durante a estação de inverno.
Fonte: elaboração própria à partir dos dados das séries históricas de vazões fornecidas pela PETROBRAS.

2.2 Modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento dos recursos hídricos.

Sabe-se que o recurso natural água tem sido um tema muito discutido pela população e governantes devido ao fato de ser essencial à manutenção da vida em geral e das atividades humanas. Se antes havia a certeza de que a água é um recurso infinito, hoje já se sabe que se mostra escasso, tanto em quantidade como em qualidade (QUINTINO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2007). Para fins de preservação dos recursos hídricos existentes, no Brasil, contamos com um vasto arcabouço legal, alicerçado na tríade composta pelos poderes municipal, estadual e federal. Rodrigues, Lugon e Tavares afirmam que "dentre os instrumentos de controle previstos em nossa legislação, destacam-se o monitoramento e o diagnóstico da qualidade dos recursos hídricos, em especial dos rios e estuários" (RODRIGUES; LUGON; TAVARES, 2007). [...] Sob este aspecto, os ditos modelos de qualidade de água constituem-se em ferramentas extremamente úteis (LUGON; RODRIGUES, 2008).

Segundo Lugon e Rodrigues, o diagnóstico da qualidade de água de um corpo hídrico, convencionalmente, baseia-se na análise de alguns parâmetros - previstos, geralmente, em legislação (LUGON; RODRIGUES, 2008). Historicamente, a avaliação do comportamento de constituintes dos corpos de água iniciou-se pelo desenvolvimento de modelos chamados do tipo "caixa-preta", em que a remoção ou produção do constituinte era avaliada pelo balanço de massa existente entre sua entrada e sua saída no corpo hídrico considerado. Tal abordagem, baseia-se em monitoramento intensivo, com óbvias limitações logísticas e econômicas. Alternativamente, o comportamento de substâncias nesses corpos de água pode ser estimado através de modelos matemáticos e computacionais (LUGON; RODRIGUES, 2008; RODRIGUES; LUGON; TAVARES, 2007):

> [...] Embora sejam sempre abstrações da realidade, se consistentes, tais modelos reduzem tempo, custo e risco de análises de impactos que estejam sendo avaliados sobre os corpos hídricos. [...] Idealmente, apresentam-se como os instrumentos mais adequados de diagnóstico e prognóstico de ambientes aquáticos, pois, uma vez calibrados, diversos cenários podem ser gerados, bastando-se que para isso sejam modificados os dados de entrada e saída do modelo [isto devido à necessidade de um conjunto de entradas, reações internas e o formato do corpo hídrico para que se efetivar a construção, implementação e validação do modelo]. (LUGON; RODRIGUES, 2008).

> [...] Por meio dessas simulações, é possível avaliar situações críticas, tanto de operações industriais quanto ambientais e tomar decisões antecipadas sobre as mesmas. Sabendo como o sistema irá responder aos diversos fatores, é possível direcionar ações ambientalmente mais apropriadas. (RODRIGUES; LUGON; TAVARES, 2007).

Considerando as vertentes supracitadas, pode-se reconhecer a utilidade de modelos matemáticos para a gestão de recursos hídricos. Um outro ponto a ser considerado, é a possibilidade de se ilustrar com clareza, ora por gráficos ora por animações visuais, propriamente ditas, situações que via de regra são difíceis de serem transmitidas. Isto é, embora a realização de uma simulação demande uma gama mínima de conhecimentos, os resultados obtidos podem ser visualizados com facilidade. Deste modo, pode-se fazer do uso deste ferramental uma alternativa de abordagem tanto da população leiga, para sua conscientização acerca da necessidade de preservação dos recursos naturais, quanto dos responsáveis por gerir tais recursos.

A modelagem matemática é bastante utilizada para se estudar os sistemas hídricos, mas são poucos os programas que conseguem uma interface entre as diferentes áreas de estudo, tais como: bacias hidrográficas, estuários, oceanos, rios, entre outros. O MOHID – Water Modelling System foi escolhido por permitir esta integração.

O MOHID consiste num modelo tridimensional desenvolvido pelo grupo de investigação de tecnologias marinhas (MARETEC) do Instituto Superior Técnico e pela Hidromod, Portugal. Este modelo é usado em diversas áreas científicas nomeadamente na hidrodinâmica, ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água e ecologia, fluxo de água no solo e derrames de hidrocarbonetos. Consiste num modelo que permite a simulação de processos físicos, químicos e biológicos. Esta complexidade de processos pode ser executada em qualquer número de dimensões (1D, 2D, 3D). Trata-se de um modelo cuja programação é orientada por objetos e cuja linguagem utilizada é a ANSI Fortran 95 (MARETEC, 2010). Outra característica do modelo é a possibilidade de execução do programa em cascata, de modo que cada execução do modelo crie condições de fronteira para a etapa seguinte de modelagem. Este tipo de organização permite, por exemplo, um sucessivo estreitamento da malha. A malha computacional, onde o modelo é executado, é o local onde se define a topografia e/ou a batimetria da zona em estudo, bem como a geometria vertical. Trabalha com volume finitos e permite escolher qual a camada que se pretende estudar, de modo que permite, por exemplo, a individualização de diferentes ecossistemas. A definição da malha

computacional aceita ainda fronteiras móveis, o que permite a modelagem em estuários das zonas entre marés (LIMA, 2010).

O modelo em si é composto por um grande número de módulos, em que cada um deles corresponde a um tipo de informação (hidrodinâmica, qualidade da água, etc.). Este tipo de estrutura permite que os erros não passem de um módulo para outro. A arquitetura modular orientada por objetos desde modelo foi a base para a criação do atual MOHID Water Modeling System, que é um sistema de várias ferramentas numéricas. Atualmente existem três programas principais: (i) MOHID Water, (ii) MOHID Land e (iii) MOHID Soil. A primeira ferramenta é uma versão atualizada para simular processos em corpos de água superficiais, a segunda pode ser utilizada na modelação de bacias hidrográficas e a terceira destina-se para o estudo dos processos em meios porosos. Atualmente o Mohid Water Modeling System é considerado um sistema robusto e confiável para a modelação integrada dos recursos hídricos (LIMA, 2010).

O módulo hidrodinâmico resolve a forma primitiva tridimensional das equações de movimento. Já o módulo euleriano simula a evolução das propriedades da água em toda a coluna de água. O módulo de transporte lagrangeano utiliza o conceito de traçadores para simular processos localizados com elevados gradientes. Existe também o módulo da qualidade da água que simula as propriedades para cada ponto da malha a produção e destruição de uma determinada propriedade. A informação acerca da energia cinética turbulenta é fornecida ao restante do módulo pelo módulo da turbulência (LIMA, 2010).

Diversas variáveis de estado podem ser simuladas pelo modelo. No campo hidrodinâmico são simuladas componentes da velocidade, os fluxos e os níveis. Relativamente à densidade da água, a temperatura e a salinidade são as variáveis de estado modeladas. Existe uma série de outras variáveis de estado associadas a cada um dos módulos do programa. Na qualidade da água temos, por exemplo, o oxigênio dissolvido, os nitratos ou o fitoplâncton. No que diz respeito à comunicação entre o utilizador e o modelo esta é feita através de uma interface em ambiente Windows. Possui ainda um pós-processador que permite a visualização dos arquivos criados durante a execução do modelo. Permite a criação de figuras a partir desses mesmos arquivos sendo também possível obter animações que ilustram a evolução do sistema MOHID. A versatilidade da ferramenta MOHID Water pode facilmente ser demonstrada pelo leque de aplicações em que este modelo foi utilizado: aplicações no Atlântico Norte para o estudo geral de circulação (NEVES, *et al.,* 1998, COELHO *et al.*, 2002), derrames de petróleos (LEITÃO, *et al.,* 2003), eutrofização e tempos de residência em estuários (BRAUNSHWEING, *et al.*, 2003).

Conforme descrito por Lima, 2010, o MOHID GIS é uma ferramenta gráfica que tem como objetivo transformar informações geográficas em dados discretos do modelo. Como, por exemplo, gerando o arquivo contendo os dados de informação de profundidade, batimetria, representada na grade computacional a ser utilizada. A seguir mostraremos como isso é feito.

A partir de uma foto georeferenciada (Fig. 6.0) marcam-se os polígonos que delimitam as regiões da terra (Fig. 7.0). Assim, segundo o mesmo autor, a partir da discretização desejada, definida pela grade mostrada na Fig. 8.0, o programa gera todos os pontos de batimatria do domínio.

A batimetria gerada por esses pontos pode ser vista na Fig. 09, cujos dados são salvos em um arquivo que será utilizado pelo módulo GUI do MOHID para gerar o modelo.

O MOHID GIS pode ainda ser utilizado para determinar as coordenadas computacionais de pontos de interesse no estuário, como estações de medições ou pontos de descarga (LIMA, 2010).

Figura 06: Imagem Georeferenciada

Figura 07: Polígonos de terra

Figura 08: Pontos de batimetria

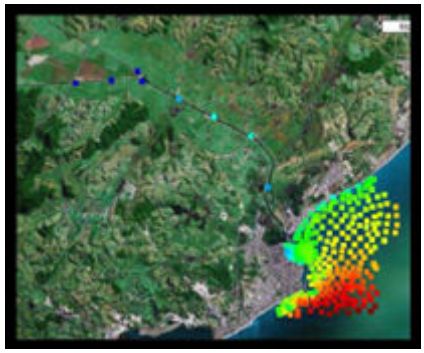

Figura 09: Grade para discretização do espaço

Quanto ao MOHID GUI, o mesmo foi desenvolvido a fim de organizar a grande quantidade de arquivos utilizados pelos módulos do MOHID, também cria automaticamente pastas para guardar os resultados das diferentes configurações de simulação.

2.3 Parâmetros empregados na modelagem aplicada aos baixo-médio cursos do rio Macaé

A principal região de estudo para modelagem na plataforma MOHID foi a região de captação de água do baixo curso do rio Macaé. Foi adotada uma discretização espacial de 20 metros, com base em células quadráticas. Os dados de batimetria foram obtidos a partir de Amaral (2003).

Duas condições de contorno foram definidas para o modelo hidrodinâmico: (i) na fronteira fluvial foi definida uma vazão do rio de 7,8 m^3 $s^{-1,}$ típica da estação seca para o rio Macaé próximo à região estuarina (AMARAL, 2003); (ii) na fronteira marítima foi simulada uma maré astronômica, com 17 componentes, com amplitude e fase apresentadas na Tabela 1.

Para as simulações desta modelagem foi necessário "encher o rio" e para isto foi simulada uma descarga de 6 m3 s-1, divididos em 3 m3 s-1 lançado em cada margem do rio. E mais 1,8 m3/ s-1 no rio São Pedro, totalizando 7, 8 m3/ s-1. Foram necessárias aproximadamente 08 horas para o enchimento total do rio e concomitantemente para o início das simulações.

O valor adotado para a salinidade na região fluvial foi de 0,37 psu (unidade de salinidade), e na região marinha 36 psu. Como condição inicial uma salinidade de 20 psu foi definida para todo o domínio. Os resultados obtidos com este modelo foram apresentados por Lima et al. (2008) e Rodrigues et al. (2009).

Componente	Período (*s*)	Amplitude (*m*)	Componente	Período (*s*)	Amplitude (*m*)
M2	44714,16	0,369	MN4	22569,03	0,012
S2	43200	0,191	MS4	21972,02	0,011
O1	92949,63	0,1	2N2	46459,35	0,1
K1	86164,09	0,059	M1	89399,69	0,009
K2	43082,05	0,054	M3	29809,44	0,004
N2	45570,05	0,046	MO3	30190,69	0,003
Q1	96726,08	0,026	MK3	29437,7	0,002
M4	22357,08	0,024	SN4	22176,69	0,002
P1	86637,21	0,021	*	*	*

TABELA 1. Amplitude das componentes adotadas no modelo de simulação de marés.
Fonte: Lima, 2010.

2.4 Referencial teórico e fundamentação

Na sociedade atual, é de fundamental importância a preservação dos recursos hídricos existentes. Torna-se mais crítico a manutenção destes recursos em termo de qualidade e quantidade. A escassez e deterioração deste recurso já afetam parcela significativa da população mundial (KELMAN, 1999).

A formulação matemática utilizada na simulação do transporte de substâncias em estuários e rios normalmente contempla a variação temporal. No que tange ao espaço, tal formulação pode ser tri, bi ou unidimensional, em função das características físicas e morfológicas do sistema. No caso do escoamento estuarino, a formulação é essencialmente tridimensional, em função da estratificação que eventualmente se forma na coluna d'água, com a água doce (menos densa) escoando sobre a água salina (mais densa). Entretanto, estuários submetidos a uma amplitude de maré suficientemente grande (mais do que 4 metros) e com vazão do principal aporte fluvial suficientemente pequena, podem ter sua hidrodinâmica convenientemente simulada pelo sistema de equações que se denomina "Equações de Águas Rasas (EAR)" (ROSMAN, 1989), que resolvem as variáveis do escoamento assumindo que essas variam pouco na direção vertical.

A avaliação do comportamento de constituintes dissolvidos e em suspensão em rios iniciou-se pelo desenvolvimento de modelos chamados do tipo "caixa-preta", em que a remoção ou produção do constituinte era avaliada pelo balanço de massa existente entre a entrada e saída de um dado trecho de seu curso. Essa abordagem depende de monitoramento intensivo, possuindo óbvias limitações logísticas e econômicas. Uma alternativa é estimar o comportamento de substâncias em estuários através de modelos matemáticos.

Os modelos determinísticos possibilitam descrever a hidrodinâmica e o transporte de solutos ou suspensões dentro do sistema. Tais modelos apresentam-se como as ferramentas mais adequadas de diagnóstico e prognóstico de ambientes fluviais, pois, uma vez calibrados, diversos cenários podem ser gerados, bastando-se que para isso sejam modificados determinados dados de entrada do modelo.

Primeiramente deve ser construído um modelo hidrodinâmico (MH), que permite resolver a distribuição espaço-temporal de velocidades e elevação de nível d'água. A seguir desenvolve-se um modelo de transporte de substância conservativa (MTSC), sobre o qual é desenvolvido um modelo de transporte do constituinte (MTSNC) em estudo.

O grau de empirismo de tais modelos também cresce obedecendo a mesma seqüência. Sendo assim, os MH fundamentam-se em equações bem estabelecidas pela Mecânica dos

Fluidos, a partir das quais algumas simplificações são assumidas. Os MTSC são expressos por uma equação em que a principal incerteza está na definição do coeficiente de dispersão, enquanto que nos MTSNC, muita incerteza envolve a dependência funcional das reações que representam remoção ou produção da substância em meio fluvial.

O MOHID resolve as equações primitivas que formulam o escoamento tri-dimensional incompressível. Equilíbrio hidrostático e as aproximações de Boussinesq e Reynolds são assumidas. As Equações de momentum para as velocidades médias horizontais, na forma Cartesiana, são dadas por:

$$\partial_t u = -\partial_x (uu) - \partial_y (uv) - \partial_z (uw) + fv - 1/\rho_0 \ \partial_x p + \tag{1}$$
$$+ \partial_x ((v_H + v)\, \partial_x u) + \partial_y ((v_H + v)\partial_y u) + \partial_z ((v_t + v)\, \partial_z u)$$
$$\partial_t v = -\partial_x (vu) - \partial_y (vv) - \partial_z (uw) + fu - 1/\rho_0 \ \partial_y p + \tag{2}$$
$$+ \partial_z (v_H + v)\, \partial_x v) + \partial_y ((v_H + v)\, \partial_y v) + \partial_z ((v_t + v)\, \partial_z u$$

onde u, v e w são as componentes do vetor velocidade nas direções x, y e z, respectivamente, f o parâmetro de Coriolis, v_H e v_t a viscosidade turbulenta nos sentidos horizontal e vertical, v é a viscosidade cinemática molecular (igual a 1,3x10-6 m^2 s-1), p é a pressão. 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 equação do continuidade incompressível (equação de balanço de massa):

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \tag{3}$$

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

$$\partial_t A = -\partial_x (uA) - \partial_y (vA) - \partial_z (wA) + \tag{4}$$
$$+ \partial_x (v'_H\, \partial_x A) + \partial_y (v'_H\, \partial_y A) + \partial_z ((v'_t + v'_A)\, \partial_z A)$$

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, gerando o que se chama de simulação numérica. A base da simulação 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).

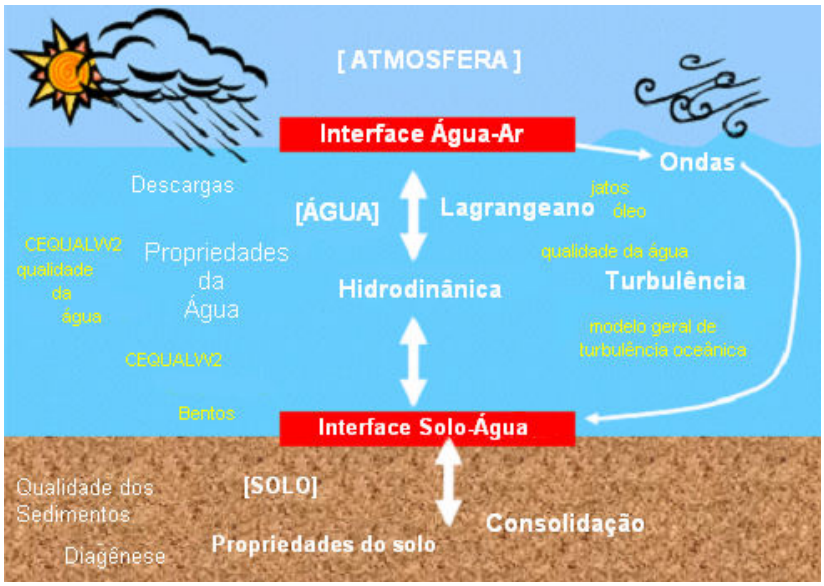

Figura 10 - Representação esquemática do MOHID, um programa tridimensional numérico para simular massas de águas superficiais (oceanos, os estuários, reservatórios e outros). Fonte: adaptado de MARETEC (2010).

Na Figura 10 é representado esquematicamente o processo de simulação do MOHID que contempla através da modelagem computacional as iterações entre o corpo hídrico com a atmosfera e com o solo.

3. ARTIGO CIENTÍFICO

USO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL NOGERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NO RIO MACAÉ: UMA ABORDAGEM PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE USOS MÚLTIPLOS.

José Henriques da Silva Tavares[1]
Jader Lugon Jr.[2].
Haydda Manolla Chaves da Hora[3].

1. INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE / *Campus Macaé* / 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.

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar cenários obtidos por meio da modelagem computacional e simular através do programa MOHID (Water Modelling System) variáveis de batimetria e fluviometria que podem alterar a disponibilidade hídrica no ponto de captação de água para uso industrial e abastecimento público na localidade de Severina em Macaé-RJ, bem como servir de insumo às decisões para os gestores ambientais, de forma possibilitar a minimização de conflitos futuros devido aos usos múltiplos da água.

ABSTRACT

The present paper presents scenarios obtained by computational modeling and simulating applying the program MOHID (Water Modelling System), program to bathymetry and fluviometric variables that can alter water availability at the point of

abstraction of water for industrial and public supply locality in Severina, Macaé –RJ, as well to serve as input to decisions for environmental mangers, enable to minimize possible future conflicts due multiple uses of water.

INTRODUÇÃO

Atualmente as pressões sobre o meio ambiente vem se intensificando a cada dia, causando impactos cênicos e ameaças as diversas formas de vida. Essa situação tem levantado discussões nos campos científico, político, social e econômico do Brasil e do mundo. Todas essa preocupação com a água, seja com a sua disponibilidade ou mesmo com sua degradação, sinalizam que ações de caráter urgente deverão ser tomadas voltadas a preservação, conservação e recuperação deste importante recurso para a para a própria sobrevivência do homem.

Apesar dos múltiplos e essenciais usos das águas, sua inadequada gestão pode propiciar situações de redução de disponibilidade hídrica ou mesmo de escassez. Nesse sentido há carência de estudos regionais que possam subsidiar planos diretores de recursos hídricos de importantes mananciais existentes no Estado do Rio de Janeiro, com vistas a garantir o equilíbrio entre as disponibilidades e as demandas futuras dos recursos hídricos (em quantidade e qualidade). Configurado tal cenário, o presente estudo utiliza modelagem computacional (MOHID - Water Modelling System) como ferramenta para gerar prognósticos aplicáveis ao estudo de conflitos de uso da água, ora dados em razão de demandas quantitativas, ora por demandas qualitativas. No primeiro caso, o modelo será adaptado para simulações na Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, Macaé, Rio de Janeiro, Região Hidrográfica VIII (RIO DE JANEIRO, 2006), de seu estuário à região de Severina, aonde se localizam as principais captações industriais (abastecimento de plataformas de produção e exploração de petróleo *offshore* da Bacia de Campos e de água de resfriamento para Termoelétricas) e de abastecimento público. A região do estudo (baixo curso do rio Macaé) está localizada no litoral Norte Fluminense e sofre com os impactos ocorridos no alto e médio curso da bacia hidrográfica. A bacia apresenta dois aproveitamentos hidrelétricos, na sub-bacia do rio São Pedro pela UHE Macabu e UHE de Glicério atualmente desativada, No baixo curso do rio Macaé estão instaladas duas usinas termelétricas, a UTE Mário Lago e

a UTE Norte Fluminense que recentemente foram incorporadas ao patrimônio da PETROBRAS.

REVISÃO DA LITERATURA

Uma bacia hidrográfica é considerada a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Considerando ainda que faz parte dos objetivos da PNRH assegurar às atuais e futuras gerações a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, bem como a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais, torna-se imperativo a caracterização e o diagnóstico do uso e da ocupação da terra e do manejo dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, notadamente em suas porções à montante.

Por meio do material particulado em suspensão e das substâncias dissolvidas advindas de suas bacias de drenagem, os rios atuam como integradores dos processos naturais e/ou antrópicos ao longo do sistema hídrico (BERNER; BERNER, 1996). O transporte de macro e micro nutrientes ao longo da bacia de drenagem está fortemente associado à dispersão do material dissolvido e particulado em suspensão, que é geralmente um dos componentes de uma função de diversas variáveis, tais como: condições hidráulicas; processos de mistura de sedimentos contaminados e não contaminados; coagulação, deposição e estocagem nas planícies de inundação, substrato fluvial, lagos, represas, e estuários; distribuição de partículas de acordo com tamanho e densidade, por exemplo (FOSTER; CHARLESWORTH, 1996; MILLER, 1997; CARROL *et al*, 2000).

No Brasil, até 1920, à exceção das secas do Nordeste, a água não representou problemas ou limitações. A cultura da abundância atualmente prevalecente teve origem nesse período. Ao longo da década de 70, e mais acentuadamente na de 80, a sociedade começou a despertar para as ameaças a que estaria sujeita se não mudasse de comportamento quanto ao uso e à manutenção da qualidade de seus recursos hídricos (BARCELLOS *et al.,* 2006). Por ser a água um solvente versátil, os corpos hídricos, notadamente de ambientes lóticos, frequentemente vem sendo usados para transportar produtos residuais para

longe do local de produção e descarga, funcionando como locais de disposição final de efluentes. Infelizmente, os produtos residuais transportados são frequentemente tóxicos, e sua presença pode degradar seriamente o ambiente do rio, lago ou riacho receptor (WHITE e RASMUSSEN, 1998). Além das questões relacionadas ao lançamento direto de efluentes, sem tratamento, em corpos hídricos receptores, a rápida urbanização concentrou populações em locais carentes de serviços essenciais de saneamento. Isto contribuiu para gerar poluição concentrada, sérios problemas de drenagem agravados pela inadequada deposição de lixo, pelo assoreamento dos corpos d'água e/ou pela consequente diminuição das velocidades de escoamento das águas (MORAES; JORDÃO, 2002).

Devido ao fato dos corpos hídricos superficiais serem os principais responsáveis pelo recebimento final de toda essa carga poluidora, medidas operacionais visando avaliar a melhoria e a conservação da qualidade da água estabelecida para cada corpo de água vem sendo implementadas por força de exigência legal (BRASIL, 1997; 2000a; 2000b; 2005; 2006). Da mesma forma, estudos sobre a avaliação da disponibilidade hídrica para aproveitamentos diversos vem sendo conduzidos através do conhecimento de aspectos vinculados às variações de vazão, pluviometria, tempo de residência da água, curvas de cota vs área vs volume, etc. (ANA, 2009). Além da qualidade físico-química e microbiológica da água, segundo a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH n°. 12/2000 (BRASIL, 2000), os procedimentos para enquadramento dos corpos hídricos deverão também ser desenvolvidos em conformidade com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia e, no caso, com o Plano Estadual de Recursos Hídricos e, se não existirem ou forem insuficientes, com base em estudos específicos propostos e aprovados pelas respectivas instituições competentes do sistema de gerenciamento dos recursos hídricos. Deverão ser observadas as seguintes etapas: (i) diagnóstico do uso e da ocupação da terra e dos recursos hídricos na bacia hidrográfica; (ii) prognóstico do uso e da ocupação do solo e dos recursos hídricos na bacia hidrográfica; (iii) elaboração da proposta de enquadramento e (iv) aprovação da proposta de enquadramento e respectivos atos jurídicos.

De importância singular, destaca-se o trabalho desenvolvido por Pinheiro (2008) que realizou um diagnóstico da bacia hidrográfica do Rio Macaé quanto à situação da qualidade de seus recursos hídricos, e adaptou as informações geradas à linguagem dos decisores, por meio da utilização de um índice de qualidade das

águas (IQA), e pela espacialização das informações relativas não só a qualidade e ao uso da água, mas também ao uso e ocupação da terra. Entretanto, em função da complexidade e da dimensão da bacia hidrográfica estudada, compreendendo uma área de drenagem de 1.765 Km^2 distribuídos em seis municípios, a autora sugere a realização de um levantamento detalhado dos usos da água em cada trecho, a fim de identificar fontes poluidoras significativas. Recomenda ainda a expansão da rede de monitoramento para sub-bacias e a substituição do IQA, pelo IB (Índice de Balneabilidade) nos pontos onde há recreação de contato primário, otimizando os recursos necessários à realização de um programa de monitoramento. A autora sugere também a adoção de índices biológicos, notadamente para o alto curso da bacia, onde se observou melhor qualidade da água, envolvendo inclusive as comunidades locais na coleta e interpretação dos dados, fato também apontado por Tavares (2008).

Por sua vez, em relação ao uso e ocupação da terra, pode-se considerar que a retirada da vegetação nativa de encosta, de topo e a movimentação constante do solo para o cultivo acentuam os processos erosivos, favorecidos pela precipitação, pelo vento (fatores de erosão hídrica e eólica respectivamente), pela irrigação e pelo uso de fertilizantes, corretivos de solo e praguicidas. A somatória destes fatores gera instabilidade nos ecossistemas terrestres, com reflexos negativos sobre os ambientes aquáticos. Faz-se necessário então, o trabalho de reposição florestal, respeitando-se a necessidade de plantio da flora nativa da região, como uma das ações prioritárias de proteção para redução do escoamento superficial difuso e a entrada de poluentes e consequentemente a poluição e assoreamento (BRIGANTE; ESPÍNDOLA, 2003).·.

Além dos aspectos abordados, o estudo hidrológico, no contexto de bacias hidrográficas, busca conceituar e modelar diferentes processos que interagem sob condições ambientais variáveis no espaço e no tempo (SCHULER, 2003). Uma das formas mais comuns de avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste do desenvolvimento e aplicação de modelos fisicamente baseados com auxílio de técnicas de mapeamento, combinando outros modelos, tais como o CN-SCS (EASTON *et al.,* 2008; STACKELBERG *et al.,* 2007), o ARNO (COLLISCHONN *et al.,* 2007) e o MOHID (WOLANSKI, 2007). Além desses, certos modelos físicos para descrever o comportamento da infiltração e propagação do escoamento (PEREIRA *et al.,* 2006; PRUSKI *et al.,* 2001) também são empregados,

para o que são necessárias séries históricas de precipitação e evapotranspiração a fim de simular o comportamento das vazões a partir de um balanço hídrico, tendo-se determinada camada de solo como controle (RIBEIRO NETO, 2006). Este tipo de investigação científica é altamente aceita, em especial quando técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e sensoriamento remoto são aplicadas para espacializar as variáveis de entrada do modelo, consistindo no estado-da-arte do conhecimento na área de engenharia de água e solo e recursos hídricos (STACKELBERG ‘ 2007; MARSIK e WAYLEN, 2006).

Assim, a simulação hidrológica surge como importante ferramenta para a previsão de respostas hidrológicas dessas unidades ambientais a determinado evento de precipitação (SILVA *et al.,* 2007). Destaque pode ser dado aos trabalhos de Queiroz e Chaudhry (2005), em complexo estudo estatístico sobre análise de eventos hidrológicos extremos, e ao trabalho de Silva *et al* (2007), sobre modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram os necessários à obtenção de dados e seu processamento: Planilhas no formato Excel e Adobe Acrobat ®; Modelo computacional – MOHID (*freeware*); Notebook; Mapas e Imagens de satélite; GPS.

Relativamente ao método, empregou-se a modelagem matemática, cujo objetivo fundamental é a representação, com o devido rigor matemático, dos fenômenos da natureza, prescrevendo comportamentos possíveis, dentro de uma determinada condição de contorno (SOUZA, 2008). Nesse sentido, os dados obtidos por medição direta (primários e/ou secundários) e/ou por interpolação, foram empregados para alimentar o *software* MOHID Water, modelo tridimensional desenvolvido pelo grupo de investigação de tecnologias marinhas (MARETEC) do Instituto Superior Técnico e pela Hidromod, Portugal (MARETEC, 2010), de modo que fosse possível construir os cenários desejados e, principalmente, alterá-los de acordo com cada demanda.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os “diversos cenários que podem ser gerados, bastando-se que, para isso, sejam modificados os dados de entrada e saída do modelo” (LUGON; RODRIGUES, 2008), há necessidade de um conjunto de dados de entradas, de reações internas, bem como do formato do corpo hídrico para se efetivar a construção, a implementação e a validação dos modelos matemáticos. Para a adaptação do modelo aos casos investigados, foram levantados dados dos corpos hídricos em estudo. Foram necessárias, em ambos os casos, informações de batimetria e pluviometria, assim como de bancos de dados de atores sociais da Bacia, como por exemplo: Instituto Federal Fluminense PETROBRAS e INMET.

Com relação ao levantamento de dados para o abastecimento do modelo na Bacia do Rio Macaé foram utilizados dados pluviométricos da Fazenda Oratório – Macaé-RJ (HINGEL *et all*, 2009). O tratamento estatístico efetuado com base nos dados de 1995 a 2005 fornecidos pela PETROBRAS, considerando a estação com maior período de seca, ou seja, coletados no inverno, que exibe os níveis mais baixos de pluviosidade. Os dados tratados serão inseridos no modelo, em fase de calibração.Terminadas as calibrações, os modelos estarão efetivamente aptos realizarem simulações, de modo que, só então, será possível estabelecer cenários ambientais passíveis de uso, no gerenciamento e estudo dos recursos hídricos.

O desequilíbrio hidrológico que vem sendo gerado no baixo curso do rio Macaé ocorre principalmente em função da eliminação da cobertura vegetal, incluindo a mata ciliar, gerando assoreamento e poluição do rio; Retilinização do baixo curso do rio Macaé eliminando os meandros acarretando numa maior velocidade e de um menor ou praticamente nulo tempo de residência da água do rio.

A Figura abaixo mostra como era a configuração atual dos rios Macaé e São Pedro antes de serem retilinizados na década de 70 pelo extinto DNOS:

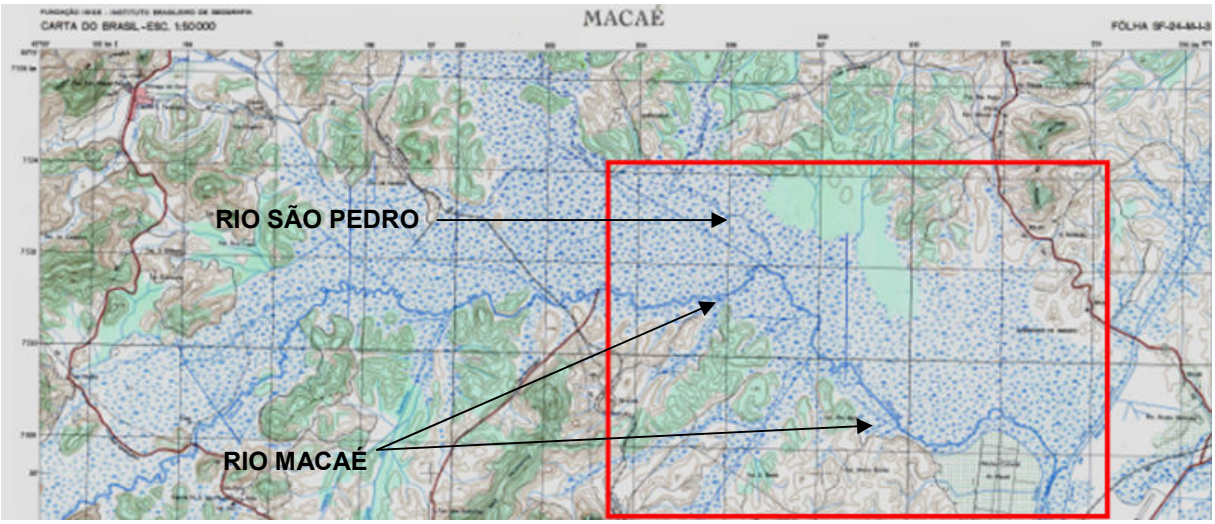

Figura 11 - Mapa hidrográfico referenciando a região de estudo antes da retilinização.
Fonte: Fundação IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia. Folha SF-24-Y-A-I-3.
Publicação autorizada pelo IBGE conforme protocolo nº 58473/2011 de 21/10/2011.
Mapa completo anexo a esta obra.

Com a utilização de modelagem computacional, através (MOHID - Water Modelling System), foram simulados o estreitamento do rio, a retirada de areia a montante das estações de captação de água, o alargamento do rio, a recuperação dos meandros e a retirada de areia próximo a foz do rio Macaé a fim de se observar o comportamento hidrológico (velocidade, vazão, batimetria, etc) do rio Macaé, à montante desta junção do rio São Pedro com o rio Macaé objetivando uma maior disponibilidade de água no ponto de captação de água bruta na estação da Severina da PETROBRAS.

Na Fig. 12 é apresentada a bacia do rio Macaé, desde a nascente em Nova Friburgo até sua foz no município de Macaé.

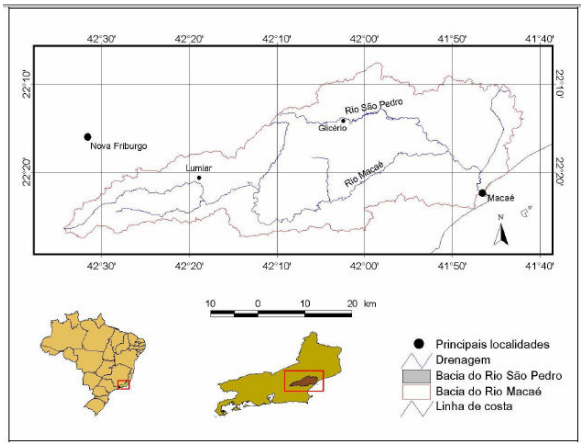

Figura 12 – Mapa de localização da Bacia do Rio Macaé (RJ)

Fonte: HINGEL et all, 2009

Figura 13 - Vista aérea dos rios São Pedro e Macaé.

Fonte: Elaboração própria, 2010.

Na Fig. 14 é representada esquematicamente o encontro dos rios Macaé e São Pedro considerando a situação atual construída no MOHID GIS.

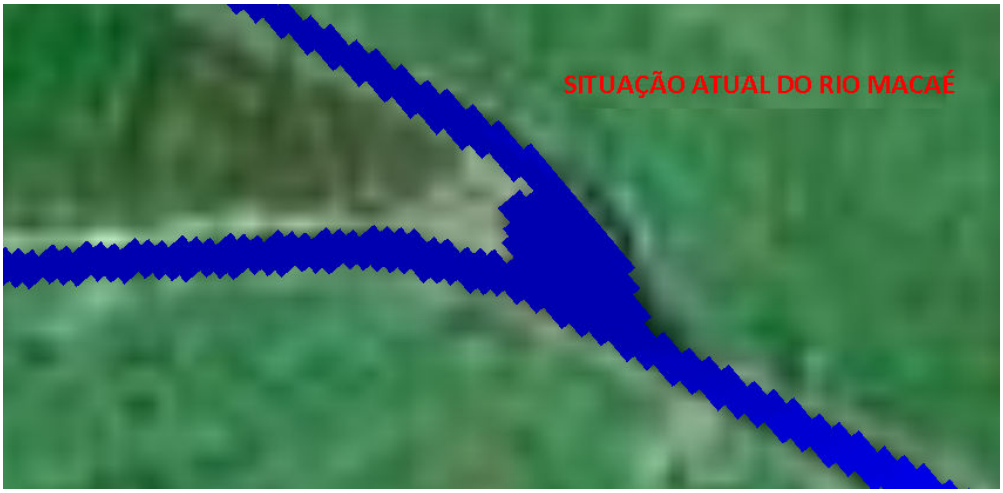

Figura 14 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a situação atual do rio Macaé.

Fonte: Elaborado pela equipe NUPERN – IFF.

Na simulação 1, representada esquematicamente na Fig. 15, foi construído um modelo de um estreitamento de 3,5 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 4200 metros, segundo a simulação desenvolvida registra-se um ganho de aproximadamente 3 cm(4%) na lâmina d'água do rio;

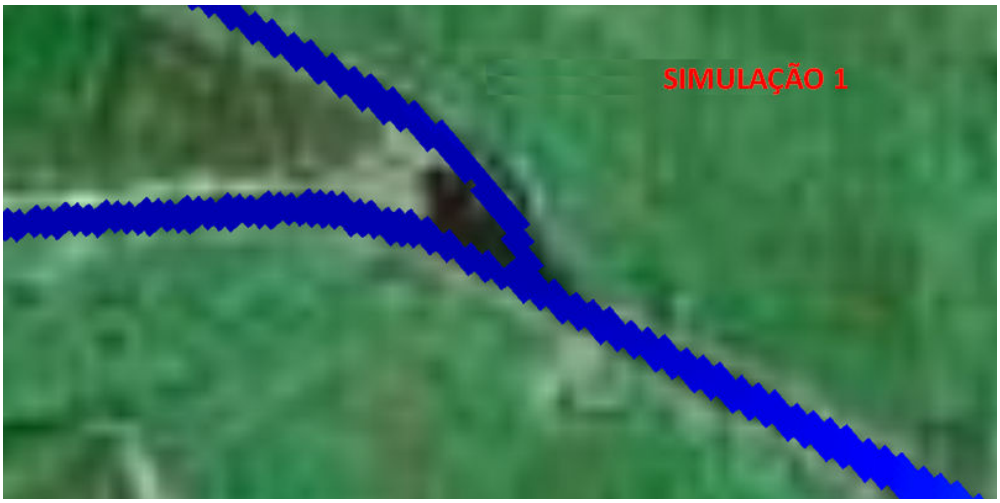

Figura 15 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 1, estreitamento do rio Macaé a jusante da captação.
Fonte: Elaborado pela equipe NUPERN – IFF.

Na Fig. 16, representa-se o encontro dos rios para a simulação 2, que considerou um estreitamento do 5,0 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 550 metros. Na simulação matemática houve um ganho de disponibilidade hídrica insignificante de aproximadamente 0,01 metros (1,5%) na lâmina d'água do rio;

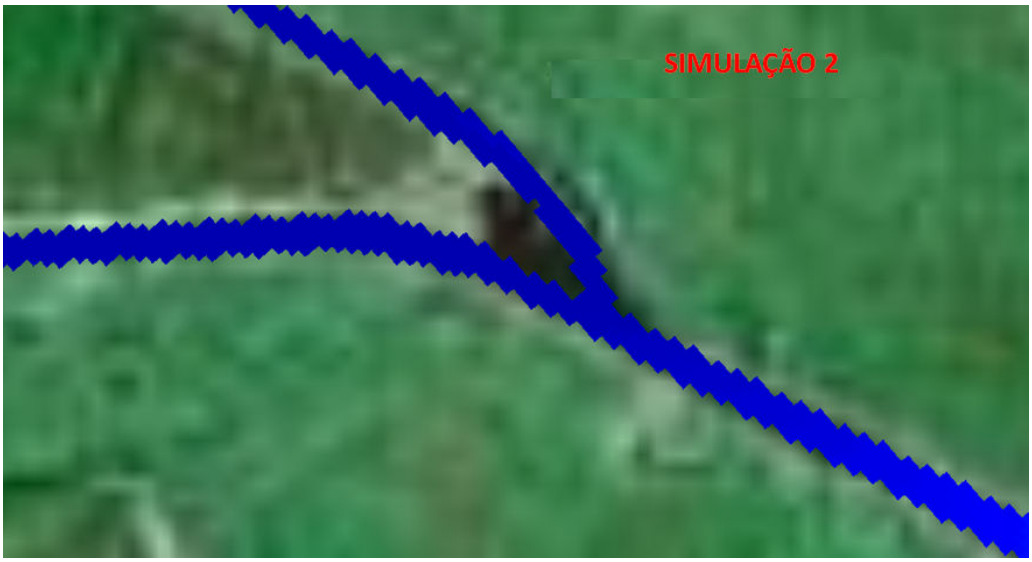

Figura 16 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 2, estreitamento de 500 metros do rio Macaé
Fonte: Elaborado pela equipe NUPERN – IFF.

Na simulação 3, foi considerada uma retirada de 24 centímetros de areia do fundo do rio Macaé em um trecho de 650 metros na região de captação de água, segundo o resultado da simulação, tivemos um ganho de aproximadamente 22 cm (23%) na lâmina d'água do rio. As alterações na configuração do rio não são representadas em uma figura, devido a alteração ser feita apenas no fundo do rio (batimetria) e não alterando sua vista superior.

Na simulação 4, representada na Fig. 17, foi considerado uma possível consequência da falta de proteção das margens gerando alargamento do rio de 3 metros em cada margem , na simulação houve uma perda na disponibilidade hídrica de aproximadamente 9 cm (12%), ou seja, uma redução na lâmina d'água do rio;

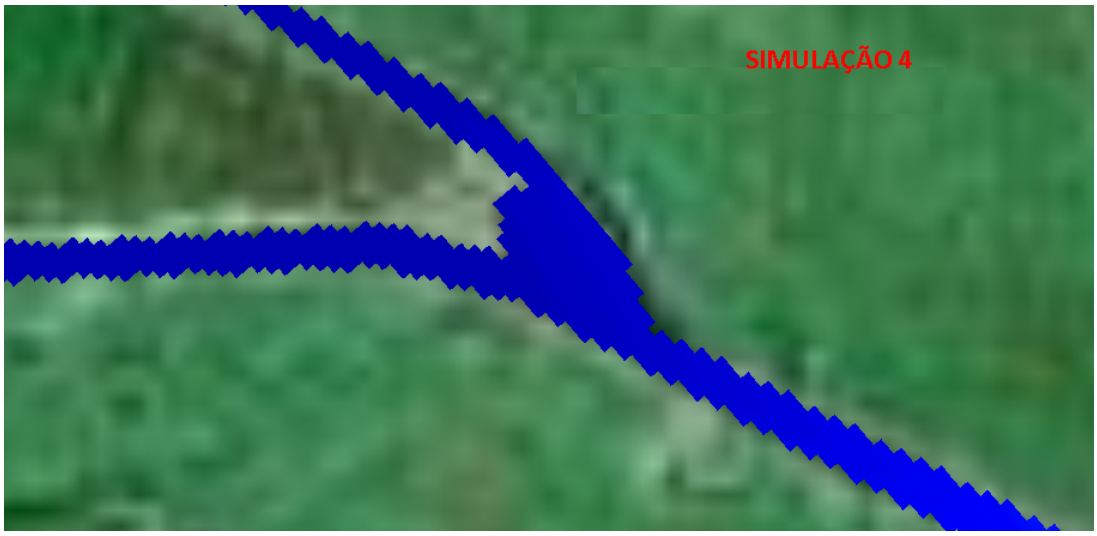

Figura 17 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 4, alargamento do rio Macaé.
Fonte: Elaborado pela equipe NUPERN – IFF.

Na simulação 5, representada na Fig. 18, foi considerada uma recuperação parcial dos meandros do rio Macaé, houve um ganho na simulação de aproximadamente 0,12 cm (16%) na lâmina d'água do rio;

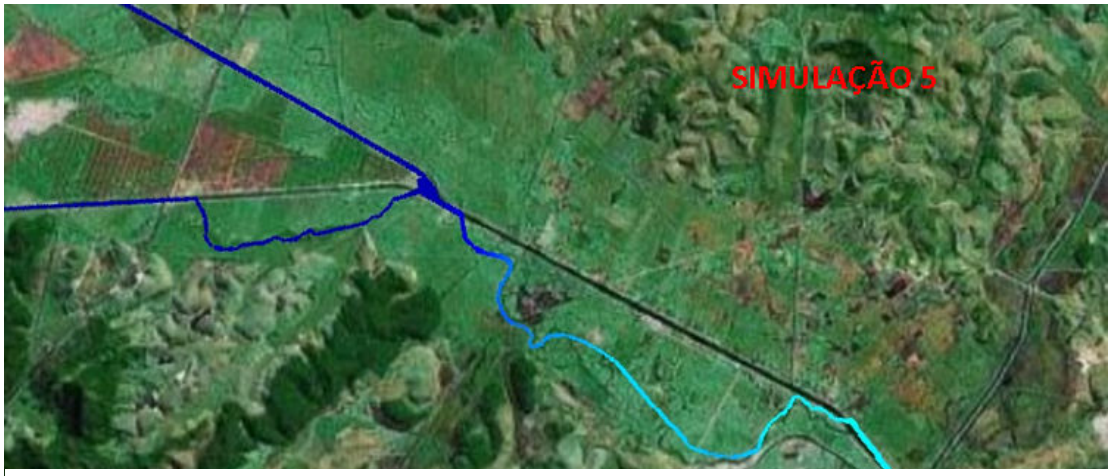

Figura 18 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 5, criação de meandros.
Fonte: Elaborado pela equipe NUPERN – IFF.

Na figura 19, foi feita uma construção para representar um possível estreitamento de 3,5 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 4200 metros e simultaneamente a retirada de 24 centímetros de areia do fundo do rio em um trecho de 650 metros na região de captação de água.

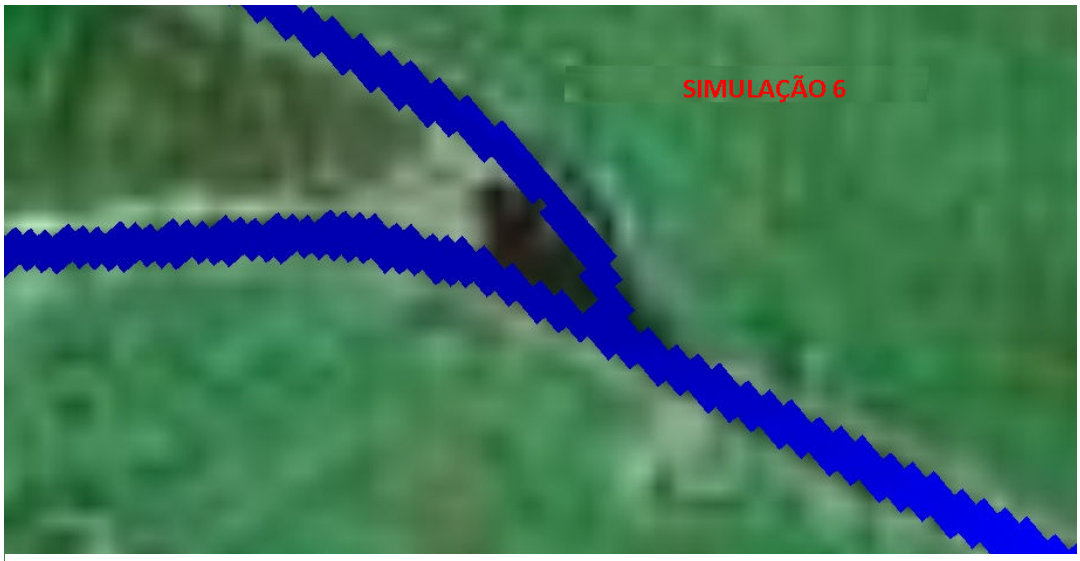

Figura 19 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 6, o estreitamento e retirada de areia.
Fonte: Elaborado pela equipe NUPERN – IFF.

Na figura 20, observa-se o local onde foi simulado a retirada de areia próximo à foz do rio Macaé, não representando nenhuma alteração significativa na lâmina d'água do rio Macaé.

Figura 20 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 7, retirada de areia próximo à foz do rio Macaé.
Fonte: Elaboração própria.

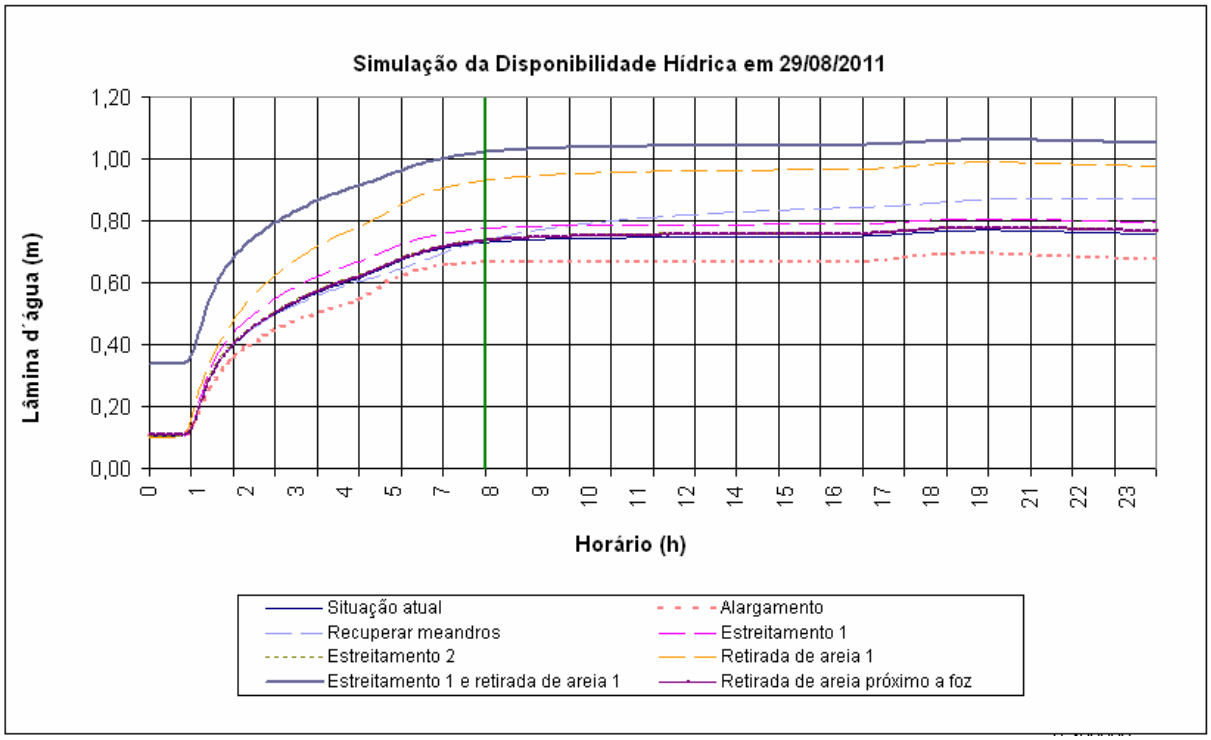

Gráfico 4 – Gráfico consolidado de todas as simulações feitas no rio.

O início da modelagem ocorre com o leito do rio vazio e após 8 horas aproximadas de simulação observamos um comportamento realista e representativo das simulações. Poderíamos excluir do relato as horas iniciais, que são necessárias para “encher" o rio, porém entendemos que a manutenção desta informação torna o relatório mais didático quanto a simulação numérica. Ressaltamos que a análise dos resultados das simulações foram feitas depois da calha do rio estar cheia.

CONCLUSÃO

A modelagem computacional aplicada ao gerenciamento de recursos hídricos, realizada com auxílio do MOHID - Water Modelling System, mostrou-se uma ferramenta adequada de apoio à decisão para gestores ambientais, de forma a simular cenários de disponibilidade hídrica que possibilitem minimizar conflitos futuros devidos aos usos múltiplos da água, uma vez que as respostas da modelagem à intervenções antrópicas podem ser simuladas, evitando assim a execução de ações que poderiam causar impactos negativos, com consequentes reduções qualitativas e quantitativas dos recursos hídricos. No caso das bacias estudadas, na Região Hidrográfica VII do Estado do Rio de Janeiro, o modelo oferece possibilidade de geração dos cenários de disponibilidade hídrica necessários aos Organismos de Bacia regionais no estabelecimento de diretrizes de outorga e de intervenção a serem apontadas nos Planos de Bacia e também sinaliza a necessidade de intervenções no rio a fim de se obter uma maior disponibilidade hídrica na região de captação de água bruta do rio Macaé pela PETROBRAS, CEDAE, UTE Mário Lago e UTE Norte Fluminense.

Mediante aos estudos aqui demonstrados, observamos que através da modelagem computacional, a retirada de areia a montante do rio Macaé, a recuperação dos meandros e o estreitamento do rio através de obras de grande porte poderão aumentar a disponibilidade hídrica na região de captação de água. Observa-se também pelo estudo das simulações que a não recuperação da mata ciliar com o consequente alargamento do rio, poderá reduzir significativamente a disponibilidade hídrica naquela região.

A retirada de areia a montante da captação no local estudado, mostrou-se uma grande contribuinte para uma maior disponibilidade hídrica, servindo de insumo para os órgãos estaduais de meio ambiente quando da liberação de um licenciamento ambiental para extração de areia.

Importante ressaltar a importância da realização de medidas de curto prazo, tais como a recuperação da mata ciliar, visando evitar que o cenário de alargamento do rio Macaé se concretize, pois se trata de exigência legal, é relativamente de fácil execução e de baixo custo.

Quanto a retirada de areia próximo a foz do rio Macaé não apresentou nenhuma alteração significativa na lâmina d'água do baixo curso do rio Macaé.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas. **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos. Manual do Usuário. Julho/2009. 45p.

BARCELLOS, C.M.; ROCHA, M.; RODRIGUES, L.S.; COSTA, C.C.; OLIVEIRA, P.R.; SILVA, I.J.; JESUS, E.F.M.; ROLIM, R.G. **Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 1999-2000**. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 22, n. 9, p. 1967-1978, 2006.

BENASSULY, C. C. L. **Avaliação de redes de monitoramento de recursos hídricos: estudo aplicado às águas superficiais na bacia do rio Macaé**. [Campos dos Goytacazes] 2009. 99f. Dissertação de Mestrado – Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental.

BERNER, E.K.; BERNER, R.A. Global Environment: Water, Air and Global Geochemical Cycles. New Jersey. Prentice Hall, Inc., 1996. 453p.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Resolução n°274, de 29 de novembro de 2000b. Dispõe sobre a condição necessária das águas doces, salobras e salinas destinadas à balneabilidade (recreação de contato primário).

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Resolução n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 18.03.2005; ret. 09.05.2005.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução n° 12, de 19 de julho de 2000a. Dispõe sobre os procedimentos para enquadramento dos corpos de água segundos seus usos preponderantes. Brasília. Diário Oficial da União, 20.07.2000.

BRASIL, Lei Federal 11428, de 22 de Dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma Mata Atlântica e dá outras providencias. Brasília Diário Oficial da União, 26 de dezembro de 2006.

BRIGANTE, J; ESPÍNDOLA, L. G. E. **Limnologia Fluvial :** um estudo no Rio Moji-Guaçu. São Carlos: Rima, 2003. 255p

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, E. M. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling**. Hydrological Science Journal, v.52, n.3, p.878-895, 2007.

EASTON, Z. M.; FOKA, D. R.; WALTER, M. T.; COWAN, D. M.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S. **Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas**. Journal of Hydrology, v.348, p.279-291, 2008.

FOSTER, I. D. L. e CHARLESWORTH, S. M. **Heavy Metals in the Hydrological Cycle: Trends and Explanation**. Hydrological Processes, v.10, p.227-261, 1996.

HINGEL, R. L.; NASCIMENTO, F. J. B.; VILLAS BOAS, G. H. e MARÇAL, M.S. **Análise temporal e espacial das variações pluviométricas na bacia do rio Macaé: Contribuição na identificação de áreas suscetíveis à erosão.** XIII SBGFA – Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal de Viçosa, 2009.

LUGON, J. Jr. e RODRIGUES, P. P. G. W. Hidrologia**. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**. – Vol. 2, n. 2 (jul./dez. 2008), p. 93-106. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ: Essentia Editora, 2008.

MARETEC, 2010. **MOHID - Water Modelling System** . Disponível em :<http://maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000.htm>. Acesso: 10 jun. 2010.

MORAES, D.S.L. e JORDÃO, B.Q. **Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana.** Rev. Saúde Pública, v. 36, n. 3, p.370-400, 2002.

PEREIRA, A.; DUARTE, P. e NORRO, A. **Different modelling tools of aquatic ecosystems: A proposal for a unified approach**. Ecological Informatics. N° 1. p 407-421. 2006.

QUEIROZ, M.M.F. e CHAUDHRY, F.H. **Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos LH**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 10, n° 2, p. 381-389. 2005.

RIO DE JANEIRO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI). Resolução nº 18, de 08 de Novembro de 2006. Aprova a definição das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro.

SOUZA, A. C. Z. de; PINHEIRO. C. A. M. **Introdução à modelagem, simulação de sistemas dinâmicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 166p.

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. Piracicaba: 2003. 118p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

TAVARES, J.H.S. **RIO SANA – Aspectos limnológicos, percepção ambiental e visão da comunidade**. 2008. Projeto Final de Licenciatura em Ciências Biológicas-CEDERJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2008.

WHITE, P.A; RASMUSSEN, J.B**. The genotoxic hazards of domestic wastes in surface waters.** Mutat Res.,v. 410, p.223-36. 1998.

WOLANSKI, H. **Ecohydrology models**. In: Estuarine Ecohydrology. Chapter 6. p 107-123. 2007.

RIBEIRO NETO, A. **Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 178p. 2006.

STACKELBERG, N. O. von; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. **Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay**. Transactions of the ASABE, v.50, n.3, p.455-468. 2007.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. e Coelho, G. **Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola. V. 12, N° 3. P. 258-265. 2007.

4 RESULTADOS

A fim de atender o que foi proposto nos objetivos deste presente estudo foram criados 06 cenários e feitas simulações para variação de batimetria e fluviometria, são elas:

Cenário 1: simulação do estreitamento de 3,5 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 4200 metros;

Cenário 2: simulação do estreitamento do 5,0 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 550 metros;

Cenário 3: simulação da retirada de 24 centímetros de areia do fundo do rio Macaé em um trecho de 650 metros na região de captação de água;

Cenário 4: simulação do alargamento do rio;

Cenário 5: simulação da recuperação dos meandros do rio Macaé;

Cenário 6: simulação do estreitamento de 3,5 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 4200 metros e retirada de 24 centímetros de areia do fundo do rio em um trecho de 650 metros na região de captação de água;

Cenário 7: retirada de areia próximo a foz do rio Macaé.

No Gráfico 5 foram consolidados todos os resultados das simulações, permitindo uma melhor comparação entre os diferentes cenários simulados.

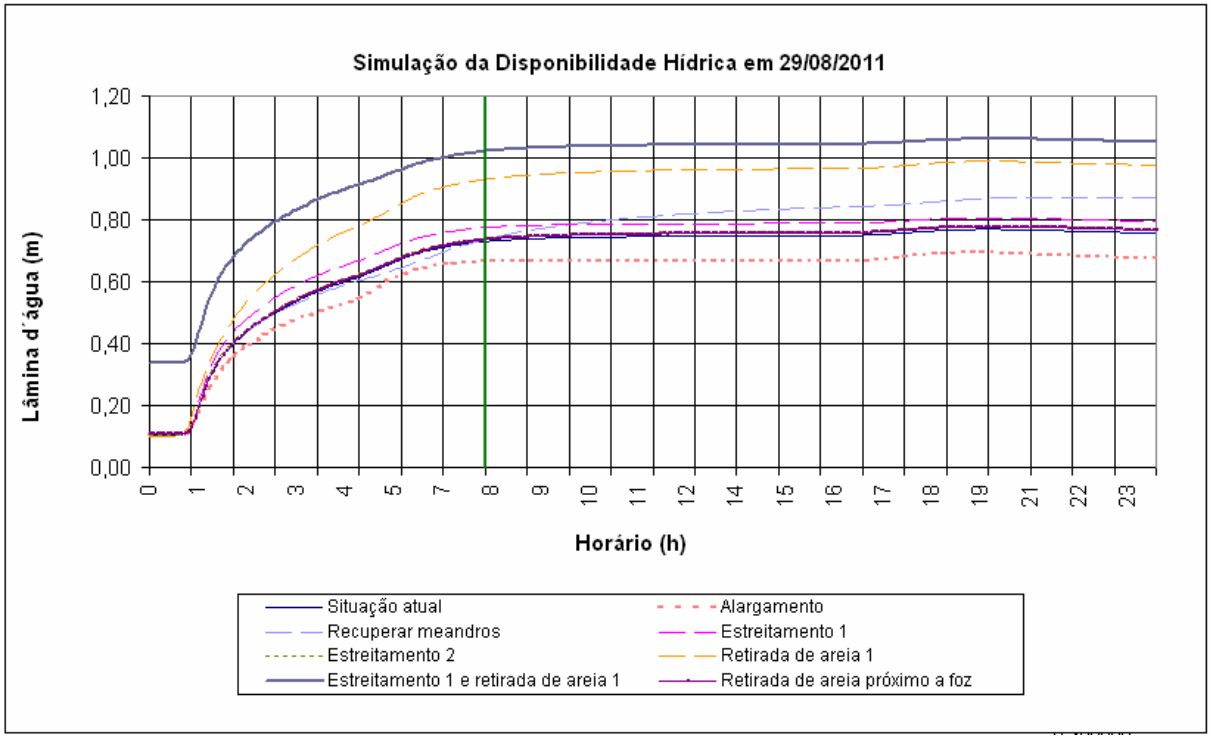

Gráfico 5 – Consolidação dos dados das simulações

Na figura 21 está representado parcialmente o modelo construído para a situação atual do rio Macaé no ponto de encontro entre os rios Macaé e São Pedro.

Figura 21 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a situação atual do rio Macaé. Esta figura é o referencial para as simulações realizadas.

Na Fig. 22, pode-se observar o modelo construído para representar o estreitamento do rio de 3,5 metros em cada margem por um comprimento de 4.200 metros. A Fig. 17 apresenta um detalhe da região de captação de água. Foi obtido um ganho de lâmina d'água durante a simulação.

Figura 22 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 1, estreitamento do rio Macaé a montante da captação.

Na Fig. 23 representa o mesmo ponto, porém para o modelo construído para o estreitamento do rio de 5 metros por 550 metros de comprimento, com o consequente ganho de água na região da captação.

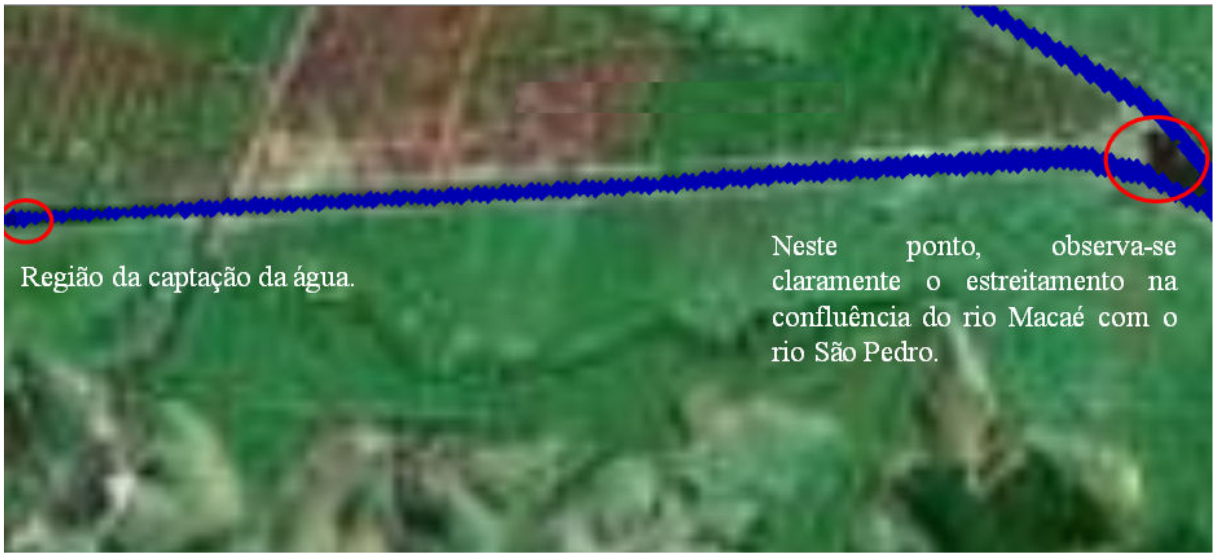

Figura 23 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 2, estreitamento de 500 metros do rio Macaé.

Na Fig. 24 mostra-se parcialmente o modelo construído para a simulação do alargamento do rio Macaé e com consequente diminuição da lâmina d'água (simulação 4).

Figura 24 – Alargamento do rio Macaé.

Na Fig. 25 é representada a reconstrução parcial dos meandros para simular o efeito dessa possibilidade na disponibilidade hídrica. Os meandros não foram reconstruídos na totalidade para evitar dificuldades na região de cruzamento do rio Macaé com a rodovia BR 101.

Figura 25 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 5, recriação de meandros.

Na Fig. 26, observa-se claramente a simulação do estreitamento do rio Macaé, no caso na região de confluência com o rio São Pedro. A outra simulação que foi feita em conjunto foi a retirada de areia e que o resultado não pode ser visto nesta vista superior, pois só altera a batimetria do rio.

Figura 26 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 6, o estreitamento e retirada de areia.

Na figura 27, observa-se o local onde foi simulado a retirada de areia próximo à foz do rio Macaé, não representando nenhuma alteração significativa na lâmina d'água do rio Macaé.

Figura 27 - Representação esquemática do MOHID GIS, apresentando a simulação 7, retirada de areia próximo à foz do rio Macaé.

5. CONCLUSÃO

O início da modelagem ocorre com o leito do rio vazio e após 8 horas aproximadas de simulação observamos um comportamento realista e representativo das simulações.

Normalmente podemos excluir o relato das horas iniciais necessárias para "encher" o rio, porem entendemos que a manutenção desta informação torna o relatório mais didático quanto ao entendimento da fase inicial das simulações.

Durante as simulações a lâmina d'água da situação atual considerada para se fazer as comparações foi de 0,76 cm.

Para uma melhor análise dos dados, o gráfico foi ampliado e teve sua escala de valores de lâmina d'água dividida com mais valores intermediários para permitir uma maior acurácia na leitura. Este gráfico entretanto não foi colocado no presente relatório por não ter um bom aspecto visual.

Na simulação 1, estreitamento de 3,5 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 4200 metros tivemos um ganho de aproximadamente 0,03 m (4%) na lâmina d'água do rio;

Na simulação 2, estreitamento do 5,0 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 550 metros tivemos um ganho de aproximadamente 0,01 m (1,5%) na lâmina d'água do rio;

Na simulação 3, retirada de 24 centímetros de areia do fundo do rio Macaé em um trecho de 650 metros na região de captação de água tivemos um ganho de aproximadamente 0,22 m (23%) na lâmina d'água do rio;

Na simulação 4, alargamento do rio, tivemos uma perda de aproximadamente 0,09 m (12%) na lâmina d'água do rio;

Na simulação 5, recuperação dos meandros do rio Macaé, tivemos um ganho de aproximadamente 0,12 m (16%) na lâmina d'água do rio;

Na simulação 6, estreitamento de 3,5 metros de cada margem do rio Macaé ao longo de 4200 metros e retirada de 24 centímetros de areia do fundo do rio em um trecho de 650 metros na região de captação de água, tivemos um ganho de 0,29 m (38%) na lâmina d'água do rio.

Finalmente na simulação 7, retirada de areia próximo a foz do rio Macaé, não houve alteração significativa a lâmina d'água do rio.

De todas as simulações que foram feitas podemos destacar o efeito do alargamento do rio que poderá ser facilmente resolvido através de um programa de reconstituição da mata ciliar com a vegetação nativa do baixo curso do rio Macaé. Este programa poderia ser feito

com a parceria da PETROBRAS, CEDAE e das UTEs que utilizam a água do rio para seus respectivos negócios, conforme citado na introdução desta obra.

Outra forma de incentivar os proprietários das terras cortadas pelo rio Macaé a replantar a mata ciliar poderia ser através do pagamento por serviços ambientais (PSA), que vem lapidando políticas públicas de conservação ambiental em diversas partes do mundo.

A idéia básica é remunerar quem preserva (direta ou indiretamente) o meio ambiente, pagando uma determinada quantia de dinheiro para o replantio e conservação da mata ciliar. Desta forma, o proprietário de uma fazenda com produção agropecuária poderia substituir ou agregar a sua atividade econômica a prestação de serviços ambientais, bastando, para tanto, recuperar e conservar o ecossistema original da sua propriedade.

Outro dado importante e que serve de insumo para os órgãos de licenciamento ambiental é o ganho de lâmina d'água com a retirada de areia do fundo do rio no ponto de captação de água numa fração do rio a montante da captação.

Quanto ao estreitamento do rio Macaé, entendemos que necessitará de grandes obras e precisando de um EVTE (Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica) não sendo possível uma implantação à curto prazo.

Outra observação importante é quanto ao retorno do rio Macaé para a sua configuração original, ou seja, desretilinização do rio (criação de meandros). Nesta situação teríamos um ganho considerável de lâmina d'água em todo ao longo do baixo curso do rio Macaé. Para que isto aconteça faz-se necessário a intervenção direta do estado, pois seria uma obra de grande monta que afetaria diretamente os proprietários de terras que margeiam o rio Macaé. Outro ganho seria a exploração da pesca artesanal no rio Macaé que foi paralisada devido a escassez do pescado em consequência da retilinização do rio.

A literatura nos mostra que através de experiências realizadas na Europa demonstram que a recomposição de rios, buscando restabelecer seu estado natural, é perfeitamente factível, mesmo com as restrições impostas no meio rural e urbano, ou até mesmo por restrições políticas. Esta renaturalização do rio deve considerar as condições naturais dos cursos hídricos e das baixadas inundáveis e evidentemente deverá ter limites, quando envolvidos a proteção das zonas urbanas e das vias de transporte.

Outros trabalhos futuros poderão ser desenvolvidos dando continuidade ao trabalho ora apresentado, tais como: simulação de renaturalização do rio Macaé (reconstituição dos meandros), simulação de uma situação de cheia, a introdução de outras variáveis ao modelo como, por exemplo, o carreamento de sedimentos, dentre outros.

Este projeto será apresentado ao Comitê de Gestão da PETROBRAS, Comitê de Bacias Hidrográficas, região VIII e a Secretaria de Meio-Ambiente de Macaé-RJ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, K., 2003. Estuário do rio Macaé: Modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. PhD thesis, COPPE/UFRJ /Rio de Janeiro.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos. Manual do Usuário. Julho/2009. 45p.

BARCELLOS, C.M.; ROCHA, M.; RODRIGUES, L.S.; COSTA, C.C.; OLIVEIRA, P.R.; SILVA, I.J.; JESUS, E.F.M.; ROLIM, R.G. **Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 1999-2000**. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 22, n. 9, p. 1967-1978, 2006.

BENASSULY, C. C. L. **Avaliação de redes de monitoramento de recursos hídricos: estudo aplicado às águas superficiais na bacia do rio Macaé**. [Campos dos Goytacazes] 2009. 99f. Dissertação de Mestrado – Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental.

BERNER, E.K.; BERNER, R.A**. Global Environment: Water, Air and Global Geochemical Cycles. New Jersey. Prentice Hall, Inc., 1996. 453p.**

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Resolução n°274, de 29 de novembro de 2000b. Dispõe sobre a condição necessária das águas doces, salobras e salinas destinadas à balneabilidade (recreação de contato primário).

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Resolução n° 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 18.03.2005; ret. 09.05.2005.**

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução n° 12, de 19 de julho de 2000a. Dispõe sobre os procedimentos para enquadramento dos corpos de água segundos seus usos preponderantes. Brasília. Diário Oficial da União, 20.07.2000.

BRASIL. Lei Federal 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o Inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal, e altera o Art. 1º da Lei Nº 8.001, de 13 de Março de 1990, que modificou a Lei Nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.**

BRASIL, Lei Federal 11428, de 22 de Dezembro de 2006. **Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma Mata Atlântica e dá outras providencias. Brasília Diário Oficial da União, 26 de dezembro de 2006.**

BRIGANTE, J; ESPÍNDOLA, L. G. E. **Limnologia Fluvial :** um estudo no Rio Moji-Guaçu. São Carlos: Rima, 2003. 255p

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; LEITÃO, P. C.; NEVES, R. J. J. **A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case**. Ocean Dynamics. Vol. 53, Nº3, p. 137-145, 2003.

CARROL, R. W. H.; WARWICK, J. J.; HEIM, K. J.; BONZONGO, J. C.; MILLER, J. R.; LYONS, W. B. **Simulation of Mercury Transport and Fate in the Carson River, Nevada**. Ecological Modelling, V. 125, p. 255-278, 2000.

COELHO, L.G.; BARTH, O.M.; CHAVES, H.A.F**. Palynological records of environmental changes in Guaratiba mangrove área, southeast Brazil, in the last 6000 years B.P**. Revista Pesquisas em Geociências, 2002. No prelo.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, E. M. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling**. Hydrological Science Journal, v.52, n.3, p.878-895, 2007.

EASTON, Z. M.; FOKA, D. R.; WALTER, M. T.; COWAN, D. M.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S. **Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas**. Journal of Hydrology, v.348, p.279-291, 2008.

FERREIRA, M.I.P., MELLO, D.S., SILVA, Y., DANTAS, R., MARINHO, P.A. In: II Congresso Acadêmico sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CADMA). **Avaliação dos processos de criação e implantação dos Comitês de Bacia Hidrográfica de corpos hídricos de domínio estadual na MRA-5 (Macrorregião Ambiental 5 do Estado do Rio de Janeiro)**. Rio de Janeiro: UFF, 2006.

FOSTER, I. D. L. e CHARLESWORTH, S. M. **Heavy Metals in the Hydrological Cycle: Trends and Explanation**. Hydrological Processes, v.10, p.227-261, 1996.

GUERRA, A.J.T. e MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 192p, 2006.

LEITÃO, J. C.; LEITÃO, P. C.; BRAUNSCHWEIG, F.; FERNANDES, R.; NEVES, R. J. J.; MONTERO, P. **Emergency activities support by an operational forecast system – The Prestige accident.** Em: Proceedings of 4th Seminar of the Marine Environment, Rio de Janeiro: 2003.

LIMA, E. B. **Problemas inversos em modelos de qualidade de água de rios e estuários.** [Rio de Janeiro] 2010. 98f. Relatório de qualificação de Doutorado, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.

LUGON, J. Jr e RODRIGUES, P. P. G. W. **Hidrologia.** Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. – Vol. 2, n. 2 (jul./dez. 2008), p. 93-106. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ: Essentia Editora, 2008.

MARÇAL, M.S.; LUIZ, L.M. **Geomorfologia Aplicada a Classificação de Unidades de Paisagem na Bacia do Rio Macaé – Litoral Norte Fluminense**. In: X Simpósio Brasileiro

de Geografia Física Aplicada, 2003. Rio de Janeiro. Anais do X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Rio de Janeiro: UERJ, 2003.

MANSAN. **Manual De Saneamento Ambiental**. Fundação Nacional De Saúde. Ministério Da Saúde. Brasília, Distrito Federal. 410p. 2004.

MATOS, B.A. e ZOBY, J.L.G. **Disponibilidade Hídrica Quantitativa e Usos Consuntivos**. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do Rio São Francisco. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. ANA/GEF/PNUMA/OEA. 113p. 2004.

MARSIK, M.; WAYLEN, P. **An application of the distributed hydrologic model CASC2D to a tropical montane watershed**. Journal of Hydrology, v.330, p.481-495, 2006.

MARGALEF, R. **Limnología**. Barcelona: Omega S.A., 1983.

MELLO, J. F. S. **Mapa de sensibilidade ambiental da microbacia do Rio São Pedro**. 4ª Jornada de Educação em Sensoriamento Remoto no Âmbito do Mercosul – 11 a 13 de agosto de 2004 – São Leopoldo, RS, Brasil. 5p.

MILLER, J. R. **The role of fluvial geomorfhic processes in the dispersal of heavy metals from Mine Sites**. Journal of Geochemical Exploration, v. 58, p. 101-118, 1997.

MORAES, D.S.L. e JORDÃO, B.Q. **Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana.** Rev. Saúde Pública, v. 36, n. 3, p.370-400, 2002.

MARETEC, 2010. **MOHID - Water Modelling System** . Disponível em : http://maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000.htm. Acesso: 10 jun. 2010.

NEVES, R.; COELHO, H.; SANTOS, A.; MARTINS, H.; LEITÃO, P.; MIRANDA, R.; MARTINS, F.; MONTERO, P. **Modeling the circulation off Iberian Peninsula**. OMEX First Annual Science Report, p. 191-202. 1998.

PEREIRA, A.; DUARTE, P. e NORRO, A. **Different modelling tools of aquatic ecosystems: A proposal for a unified approach**. Ecological Informatics. N° 1. p 407-421. 2006.

PETROBRAS, 2003. Estação de Captação de água da PETROBRAS – Macaé-RJ - E&P-SERV/US-AP/OPEI (Fotos do banco de fotos da PETROBRAS). 2003.

PINHEIRO, M.R.C. **Avaliação de usos preponderantes e qualidade da água como subsídios para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos aplicada à bacia hidrográfica do Rio Macaé**. 151f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Campos dos Goytacazes. 2008.

PLANAGUA. SEMA. **BACIAS HIDROGRÁFICAS e RIOS FLUMINENSES**. Síntese Informativa por Macrorregião Ambiental, 74p. 2001.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. **Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, p.301-307. 2001.

QUEIROZ, M.M.F. e CHAUDHRY, F.H. **Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos LH**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 10, n° 2, p. 381-389. 2005.

QUINTINO, A. S. de S. *et al.* , **Gestão participativa: recurso único para o resgate do Canal Campos-Macaé.** Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. – Vol. 1, n. 2 (jul./dez.2007), p. 25-35. Centro Federal de Educação de Tecnológica de Campos. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ: Essentia Editora, 2007.

RIBEIRO NETO, A. **Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 178p. 2006.

RIO DE JANEIRO, Decreto nº 27.462 de 28 de novembro de 2000, do Rio de Janeiro. **Autoriza a PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. a captar água do Rio Macaé.**

RODRIGUES, P.P.G.W. *et al.* **Gerenciamento de recursos hídricos e enquadramento de corpos d'água.** . Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. – Vol. 2, n.2 (jul./dez. 2008), p. 265-279. Campos dos Goytacazes, RJ: Essentia Editora, 2008.

RODRIGUES, P.P.G.W.; LUGON, J. Jr.; TAVARES, M. C. **Importância de modelos matemáticos em estudos ambientais – estudo de caso: o Rio Macaé.** Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. – Vol. 1, n. 2 (jul./dez.2007), p. 115-127. Centro Federal de Educação de Tecnológica de Campos. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ: Essentia Editora, 2007 .

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. Piracicaba: 2003. 118p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE – SEMMA – PREFEITURA MUNICIPAL DE MACAÉ, **NOSSAS ÁGUAS – CARTILHA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL**, 12p. 2001.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. e Coelho, G. **Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande**. Revista Brasilia de Engenharia Agrícola. V. 12, N° 3. P. 258-265. 2007.

STACKELBERG, N. O. von; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. **Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay**. Transactions of the ASABE, v.50, n.3, p.455-468. 2007.

TAVARES, J.H.S. **RIO SANA – Aspectos limnológicos, percepção ambiental e visão da comunidade**. 2008. Projeto Final de Licenciatura em Ciências Biológicas- CEDERJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2008.

WHITE, P.A; RASMUSSEN, J.B**. The genotoxic hazards of domestic wastes in surface waters.** Mutat Res.,v. 410, p.223-36. 1998.

WOLANSKI, H. **Ecohydrology models**. In: Estuarine Ecohydrology. Chapter 6. p 107-123. 2007.