INSTITUTO FEDERAL
Fluminense
Campus Macaé

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO

BRASIL
GOVERNO FEDERAL

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

LUCIANO VILAS BOAS

ESTUDO DAS COTAS DE INUNDAÇÃO EM CANAIS URBANOS DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ÁREAS ESTUARINAS, SOB EFEITO DE MARÉS E CHUVAS LOCALIZADAS

MACAÉ/RJ
2016

LUCIANO VILAS BOAS

ESTUDO DAS COTAS DE INUNDAÇÃO EM CANAIS URBANOS DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ÁREAS ESTUARINAS, SOB EFEITO DE MARÉS E CHUVAS LOCALIZADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na linha de pesquisa Desenvolvimento e Sustentabilidade e área temática de Produtos Inovadores para Engenharia Ambiental.
Orientador: D.Sc. Jader Lugon Junior – **IFF** (Doutor em Modelagem Computacional – **IPRJ/UERJ**)

MACAÉ/RJ
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B662e Boas, Luciano Vilas, 1958-
Estudo das cotas de inundação em canais urbanos de sub-bacias hidrográficas em áreas estuarinas, sob efeito de marés e chuvas localizadas/ Luciano Vilas Boas. — Macaé, RJ, 2016.
94 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Junior.

Dissertação (Mestrado). — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2016.
Inclui bibliografia.

1. Hidrologia. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Inundações - Macaé (RJ). 4. Simulação (Computadores). 5. Chuvas - Macaé (RJ). I. Lugon Junior, Jader, 1962-, orient. II. Título.

CDD 551.489 23.ed.

Bibliotecário-Documentalista |Henrique Barreiros Alves | CRB-7/ 6326

Dissertação intitulada Estudo das cotas de inundação em canais urbanos de sub-bacias hidrográficas em áreas estuarinas, sob efeito de marés e chuvas localizadas, elaborado por Luciano Vilas Boas 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 linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental e área temática de Avaliação Ambiental e Geotecnologias do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovada em 23/11/2016

Banca Examinadora:

.....

Jader Lugon Junior - Orientador
Doutor em Modelagem Computacional / UERJ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

.....

José Augusto Ferreira da Silva
Doutor em Geografia / UNESP
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

.....

Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues
Doutor pela School of Marine Science and Technology – Newcastle University (Inglaterra)
Professor adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Em memória:

Minha querida mãe Maria Machado Vilas Boas, por quem nutri verdadeiro amor e admiração e herdei a paixão pela natureza e simplicidade

Em vida:

A meus filhos e amigos

AGRADECIMENTOS

A melhor maneira de se começar este texto, é agradecendo àquele que nos permitiu abrir os olhos, que nos colocou de pé e nos deu força para RECOMEÇAR!

Às minhas filhas menores Luiza, Zilah e Lorrane Maria, motivo principal desta jornada e em particular ao filhão que muito me orgulha Luciano Vilas Boas Junior.

Ao meu pai Antonio Vilas Boas (em memória), petroleiro, um dos fundadores da PETROS, a quem devo meu amor à vida, à aventura, à humanidade e à justiça e pela paixão à leitura e às grandes ideias.

Ao meu orientador Jader Lugon, pela amizade, pelos incentivos e paciência no retorno, pela objetividade, conhecimento amplo e atenção permanente.

Ao IFF e todo o seu corpo de professores, por ter investido em minha formação e ter me dado essa oportunidade de “recomeçar”, em particular aos Professores Marcos Antonio Cruz Moreira e Maria Inês Paes Ferreira, aos quais agradeço fraternalmente.

A amiga e colega de turma Ana Rangel, pelo seu curso de inglês, no início da caminhada, minimizando minhas preocupações com a prova.

Aos amigos do Exército Brasileiro, que gentilmente cederam geoimagens em alta resolução e informações técnicas, tendo ainda facilitado o contato com o Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), desenvolvedores do HEC-RAS.

Aos moradores dos bairros de Aroeiras, Botafogo e Malvinas que gentilmente enviaram fotos das réguas instaladas para medição dos níveis no Canal do Capote, em particular ao Sr. Vicente que contribuiu com dezenas delas.

Aos colegas da turma 2016, pela amizade, estudos e trabalhos em grupo e, como não, pelas risadas e momentos de grande descontração!

"Inundação

A cidade teima em ficar por aqui
Às margens desse rio
É como se quisesse ouvir
O som de toda embarcação

É como se quisesse sofrer
Outra inundação
Passa o barco, a água desce,
Outra piracema

Passa o barco e o peito permanece
Quem vai se mudar?
A cidade teima em ficar por aqui
E sofrer outra inundação".

(Por Karen Mendes, Letra: Narciso Augusto)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma aplicação integrada de modelos hidrológico, hidráulico e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para delimitar áreas inundadas por uma chuva quinquenal, num canal (Capote), no município de Macaé, no Estado do Rio de Janeiro. Os programas computacionais empregados foram: o Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) para a modelagem hidrológica; o Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) para a modelagem hidráulica da superfície de inundação; e o HEC-GeoRAS para elaborar o mapeamento. Os resultados mostraram que alguns bairros da cidade de Macaé são afetados por inundações ocasionadas por uma chuva de frequência quinquenal de 72,68 mm, com seis horas de duração que resulta em um pico de cheias de 4,379 m^3 s-1, afetando parte da população do município de Macaé. Essas inundações são ocasionadas por uma conjunção de chuvas quinquenais na sub-bacia do canal e marés de sizígia. No final, comparou-se estes resultados para o canal com cheias centenárias do Rio Macaé, com base em estudo da CPRM de 2004.

Palavras-chave: Inundação urbana. Zona de inundação. SIG. Modelos Hidrodinâmicos. Modelos Digitais de Terreno. Modelos Hidrológicos. Sistemas de Informações Geográficas. Simulação Computacional. Monitoramento hidrológico na bacia.

ABSTRACT

This work presents an integrated application of hydrological, hydraulic and Geographic Information Systems (GIS) models to delimit areas flooded by a five - year rainfall in a canal (Capote) in the municipality of Macaé, in the State of Rio de Janeiro. The computational programs used were: Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) for hydrological modeling; The Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) for hydraulic modeling of the flood surface; And HEC-GeoRAS to elaborate the mapping. The results showed that some districts of the city of Macaé are affected by floods caused by a five-year frequency rainfall of 72.68 mm, with a six-hour rainfall that results in a flood peak of 4,379 m^3 s -1, affecting part of the population Of the municipality of Macaé, caused by a conjunction of five-year rains in the sub-basin of the channel and tides of syzygy. In the end, these results were compared for the flooded canal of the Macaé River, based on a 2004 CPRM study.

Keywords: Urban flood. Flood zone. Hydrodynamic Models. Digital Terrain Models. Hydrological Models. Geographic Information Systems. Computational Simulation. Hydrological monitoring in the basin.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO I

Figura 1 – Regulamentação da zona inundável. 26
Figura 2 – Pedologia da bacia do rio Macaé. 30
Figura 3 –Mapa de Uso do Solo da bacia do rio Macaé. 31
Figura 4 – Fluxograma adaptado do modelo Stanford IV. 36

ARTIGO CIENTÍFICO II

Figura 5 – Fluxograma do estudo para obtenção dos mapas de inundação. 51
Figura 6 – Temporal em 25/10/2007. 52
Figura 7 – Principais modelos para estudo de inundações. 53
Figura 8 – Malha do plano x-t usada para solução numérica das equações de Saint-Venant por diferenças finitas. 55
Figura 9 – Localização do Canal do Capote. 57
Figura 10 – Geoposicionamento da área de trabalho. 60
Figura 11 – Área de interesse dentro da BH do Rio Macaé. 62
Figura 12 – Seções transversais de referência. 63
Figura 13 – Modelo com as seções transversais interpoladas. 63
Figura 14 – Pontos de medição e variações de profundidade. 68
Figura 15 – Área de estudo com as seções transversais. 70
Figura 16 – Modelo Digital de Terreno (MDT) do canal do Capote. 70
Figura 17 – Modelo hidrológico HEC-HMS. 72
Figura 18 – Fluxograma da modelagem SCS (em vermelho) adotada. 72
Figura 19 – Hidrogramas do Canal do Capote para diferentes TR´s e duração crítica de 6 horas. 74
Figura 20 – Mapa de inundação do Canal do Capote (azul) X Inundação do rio Macaé sob influência de picos de chuva e marés de sizígia (vermelho). 82

LISTA DE FOTOS

ARTIGO CIENTÍFICO II

Foto 1 – Levantamento em campo dos dados de vazão. 59
Foto 2 – Régua limnimétrica instalada no Canal do Capote. Coordenadas (22o 22.155´S, 41o 47.950´W).....67
Foto 3 – Trecho inundado, paralelo ao Canal do Capote, na circunferência preta da figura 20, vê-se o mesmo trecho. 83

LISTA DE GRÁFICOS

ARTIGO CIENTÍFICO I

Gráfico 1 – Hidrograma de área urbanizada e não urbanizada.....32

ARTIGO CIENTÍFICO II

Gráfico 2 – Aproximações por diferenças finitas para a função u(x).....56
Gráfico 3 – Hidrógrafa do Porto de Imbetiba em Macaé / RJ em 27/10/2007.....66
Gráfico 4 – Hidrograma para chuva localizada de TR = 5 anos na microbacia do Canal do Capote.....76
Gráfico 5 – Altura crítica (yc) da onda de cheia propagada para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos na seção transversal da Estação 0 (ponte na entrada do bairro das Malvinas). 77
Gráfico 6 – Variação máxima do nível da onda de cheia propagada para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos na seção transversal da Estação 1380 (próxima ao *deck* na entrada do bairro das Aroeiras).....78
Gráfico 7 – Perfil longitudinal crítico (nível mais alto) para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos.....78
Gráfico 8 – Perfil longitudinal crítico (nível mais baixo) para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos.....79
Gráfico 9 – Mapa de inundação crítica em 3D (nível mais alto) para TR = 5 anos. 80
Gráfico 10 – Contribuição da Chuva e Maré para Elevação Crítica do Canal do Capote.....81

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO I

Tabela 1 – Tempos de Retorno (TR) exigidos para diferentes projetos hidráulicos. 39

ARTIGO CIENTÍFICO II

Tabela 2 – Resultados de Vazão - *Flow Tracker*.....59
Tabela 3 – Intensidade máxima de chuvas para o município de Macaé.....65
Tabela 4 – Altura das marés no Porto de Imbetiba em 25/10/2007. 66
Tabela 5 – Variações de marés propagadas entre o Porto de Imbetiba e entrada do Canal do Capote.....67
Tabela 6 – Elevações críticas (m) do canal do Capote com base na equação de *Manning - Stickler*.....69
Tabela 7 – Vazões máximas para diferentes TR´s do estudo. 74
Tabela 8 – Variação do nível do canal do Capote sob influência de maré de sizígia para TR = 5 anos.....80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
ADCP	*Acoustic Doppler Current Profile*
ANA	Agência Nacional de Águas
BC	Bacia de Contribuição
BH	Bacia Hidrográfica
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONPDEC	Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CTC / ENS	Centro Tecnológico / Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica de SP
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPSG	*European Petroleum Survey Group*
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
FAURGS	Fundação de Apoio à Universidade Federal do Rio Grande do Sul
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GMOC	Grupo de Modelagem Oceânica da USP.
GPDEN	Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais da UFRGS
GPS	*Global Positioning System*
HEC	*Hydrologic Engineering Center*
HMS	*Hydrologic Modeling System*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IDF	Intensidade – Duração – Frequência (das chuvas)

IFF Fluminense	Instituto Federal Fluminense
INEA	Instituto Estadual do Ambiente (RJ)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Instituto de Pesquisas Hidrológicas (UFRGS)
IPRJ	Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (UERJ)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IST	Instituto Superior Técnico
LID	*Low Impact Development*
MARETEC	*Marine and Environmental Technology Research Center*
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGB	Modelo de Grandes Bacias (IPH / UFRGS)
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MOHID	*Modeling Hidrodymanic System*
PETROS	Fundação Petrobrás de Seguridade Social
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
RAS	*River Analysis System*
RH	Região Hidrográfica
RTK	*Real Time Kinematic*
SCS	*Soil Conservation Service*
SINPDEC	Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SWMM	*Storm Water Management Model*
TCE RJ	Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro
TR	Tempo de Recorrência
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHE	Usina Hidroelétrica
UN	*United Nations*
UNISDR	*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*
US Army	Exército dos Estados Unidos

USACE	*U.S. Army Corps of Engineers*
USGS	*US Geological Survey*
UTE	Usina Termelétrica
UTL	Universidade Técnica de Lisboa
UTM	*Universal Transversa de Mercator*

SUMÁRIO

RESUMO.....vii
ABSTRACT viii
LISTA DE FIGURAS.....ix
LISTA DE FOTOS x
LISTA DE GRÁFICOS xi
LISTA DE TABELAS.....xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xiii
1 APRESENTAÇÃO 19
2 ARTIGO CIENTÍFICO I 21
RESUMO.....**21**
ABSTRACT **21**
2.1 Introdução **22**
2.2 Revisão de literatura 23
2.2.1 Marco Legal.....23
2.2.1.1 Legislação federal pertinente as cheias 23
2.2.1.2 Legislação estadual pertinente a cheias 24
2.2.2 Zonas inundáveis 25
2.2.3 Classificação dos eventos de cheias 27
2.2.4 Ciclo Hidrológico 28
2.2.5 Principais componentes de interesse do Ciclo Hidrológico 28
2.2.5.1 Interceptação vegetal 29
2.2.5.2 Infiltração.....29
2.2.5.3 Tipo do Solo 29
2.2.5.4 Ocupação Urbana 31
2.2.5.5 Escoamento Superficial 32
2.2.5.6 Normais Climatológicas (temperatura, precipitação e umidade relativa) 33
2.2.6 Métodos e Modelos para estudo de cheias 33
2.2.6.1 Métodos estatísticos.....33
2.2.6.2 Método Racional.....34
2.2.6.3 Estudos hidrológicos de vazões máximas 35
2.2.6.4 Modelos Hidrológicos 36
2.2.6.5 Modelos de Simulação.....36

2.2.7 Medidas para Controle de Cheias 37
2.2.8 Tempo de Retorno para diferentes tipos de obra 38
2.2.9 Monitoramento e modelagem hidrológica na bacia 39
2.2.10 Mapeamento de Áreas de Risco para Prevenção de Desastres Hidrológicos 40
2.2.11 Estudos Preliminares das Cheias e Inundações na Bacia do Rio Macaé 40
2.3 Resultados e discussão 41
2.4 Conclusões 42
REFERÊNCIAS 43
3 ARTIGO CIENTÍFICO II 48
RESUMO 48
ABSTRACT 49
3.1 Introdução 49
3.2 Metodologia 53
3.2.1 Formulação matemática 53
3.2.2 Área de Estudo 56
3.2.3 Levantamento de dados - Hidrometria do canal do Capote 58
3.2.3.1 Dados de vazão do canal 58
3.2.3.2 Dados topobatimétricos 60
3.2.3.3 Dados de chuva 64
3.2.3.4 Dados de Marés de Sizígia 65
3.2.3.5 Dados de nível do canal - Réguas limnimétricas 67
3.3 Desenvolvimento 68
3.3.1 Cálculo das elevações críticas do nível do canal – Equação de *Manning- Strickle*r . 68
3.3.2 Criação do Modelo Digital do Terreno 69
3.3.3 Cálculo do Modelo Hidrológico - Hidrogramas 71
3.4 Resultados 74
3.4.1 Condições iniciais, de contorno e parâmetros. 75
3.4.2 Simulação: Cenário 1 – Maré de sizígia de 25/10/2007, com chuva de 5 anos na microbacia, sem influência de cheias do rio Macaé. 76
3.4.3 Calibração do Modelo 81
3.4.4 Verificação e Validação do Modelo 81
3.4.5 Simulação: Cenário 2 – Sizígia, chuva com TR = 100 anos na microbacia do Canal do Capote e inundação pelo rio Macaé. 82
3.5 Conclusões 83

3.6 Trabalhos futuros **85**
3.7 Agradecimentos finais **86**
REFERÊNCIAS **86**
ANEXO A – Reservatórios **90**

1 APRESENTAÇÃO

O trabalho aqui apresentado, sobre inundações de canais urbanos, baseou-se inicialmente no modelo MGB-IPH 2015 utilizado, dentre outros, nas atividades previstas pelo Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e Modernização do Monitoramento Hidrológico do Brasil, objeto do convênio "Projeto FAURGS – IPH/UFRGS – Parte A", financiado pelo CT-Hidro - Fundo Setorial de Recursos Hídricos do MCT/FINEP. O objetivo desta iniciativa é facilitar a utilização deste Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, MGB-IPH para seus usuários finais.

Este modelo seria aplicado ao Rio Macaé. Entretanto, verificou-se a grande necessidade de estudos sobre inundações em canais urbanos, comumente associados a ocorrência de chuvas de pico, influência de marés (principalmente de sizígia) e cheias de rios maiores como, no caso, o Rio Macaé.

Analisadas as demais boas opções de modelos existentes no mercado, tais como o MOHID (modelo hidrológico - hidrodinâmico completo 3D) do Instituto Técnico de Lisboa - ITL, HEC-RAS (hidrodinâmico 2D) e HEC-HMS (hidrológico 3D), ambos do Exército Americano (*US Army*), optou-se pelo conjunto do *US Army*, apenas pelo fato do conjunto oferecer respostas em tempo mais curto, possuir farta documentação e modelo disponível gratuitamente na internet e já ter sido validado em dezenas de países em todo o mundo.

Neste trabalho utilizou-se um modelo baseado nas equações de *Saint Venant* em regime não permanente, que é o modelo mais utilizado para estudos onde ocorre o efeito de ondas de propagação de retorno no corpo hídrico, no caso, canais estuarinos, permitindo a geração de mapas de risco de inundação. São normalmente executados com as vazões de pico do evento de tempestade de projeto, reproduzindo remansos para essa condição.

Este tipo de problema provoca um aumento da demanda por estudos ambientais envolvendo modelagem matemática.

O objetivo final deste trabalho é avaliar os possíveis ganhos de uma modelagem matemática, que possa vir a contribuir na definição de cenários de intervenções para controle de cheias urbanas. O mesmo se divide em 2 dois artigos:

- Artigo 1: "Revisão: Estudo de cenários de intervenção para controle das cheias do Rio Macaé utilizando modelagem computacional: Fatores relevantes e aplicações" e
- Artigo 2 (este estudo): "Estudo das cotas de inundação em canais urbanos de sub-bacias hidrográficas em áreas estuarinas, sob efeito de marés e chuvas localizadas".

No primeiro artigo fez-se uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno das “cheias”, modelo e modelagem matemática, apresentando-se conceitos ligados a modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, influência do escoamento superficial (*runoff*) e do transporte de sedimentos, ocorrência de cheias, tipos de solo e normais climatológicas (temperatura, precipitação e umidade relativa) que atuam sobre o fenômeno da inundação. Apresentou-se o uso do solo (ocupação urbana) como um dos fatores agravantes de maior influência nas cheias em áreas urbanas.

Em termos da qualidade dos dados meteorológicos disponíveis, após demonstrar-se a dificuldade da utilização de métodos determinísticos, apresentou-se alguns métodos estatísticos utilizados principalmente na modelagem hidrológica.

Em função da grande utilização do Método Racional para cálculo de vazão de pico como solução simplificadora em bacias, provou-se a total inutilidade deste método inclusive para as citadas sub-bacias hidrográficas. O Estudo hidrológico de vazões máximas, também foi mostrado junto com as medidas para Controle de Cheias. Apresentou-se em seguida os modelos de simulação hidráulica-hidrodinâmica, dando-se ênfase ao uso do HEC-RAS. Concluindo o trabalho, apresentou-se o monitoramento hidrológico em bacias e novidades da Drenagem Ambiental.

2 ARTIGO CIENTÍFICO I

REVISÃO: Estudo de cenários de intervenção para controle das cheias do rio Macaé utilizando modelagem computacional: fatores relevantes e aplicações

RESUMO

Este artigo tem o objetivo de apresentar uma revisão sobre cheias urbanas, modelos hidrológicos e modelagem computacional, identificando sua importância nos processos de tomadas de decisão por parte de órgãos gestores. Apresenta o embasamento teórico sobre este assunto que sempre instigou a mente humana, conhecimentos como: Tempo de Recorrência (TR), Faixas de inundação / risco associado, Monitoramento hidrológico na bacia, Gerenciamento de cheias, Medidas estruturais e não estruturais para controle de cheias, Modelos hidrológicos (Racional e Stanford IV) e modelo / modelagem hidrodinâmica baseada no sistema HEC-RAS e que serão mostrados aqui de forma objetiva. Esta revisão visa também subsidiar uma modelagem computacional hidrológica dos processos de escoamento superficial (*run off*) e sua influência sobre as cheias de rios, dada a possibilidade de poder caracterizar, os impactos que as mudanças climáticas e as ações antrópicas têm exercido sobre o meio ambiente. Em todas as regiões do planeta, a quantificação do escoamento superficial e suas relações com as enchentes urbanas, são de extrema importância.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Cheia. Enchente. Alagamento. Inundação. MOHID. HEC-RAS. Rede de drenagem. Runoff. Gestão de bacia.

REVIEW: *intervention scenarios for study of flood control of Macaé river using computer modelling: significant factors and applications*

ABSTRACT

This article aims to present a review on urban floods, hydrological models and computational modeling, identifying its importance in decision making processes by management bodies, presents the theoretical basis on this subject that has always instigated the human mind, knowledge Such as: Recurrence Time (TR), Flood / associated risk bands, Basin hydrological monitoring, Flood management, Structural and non-structural flood control measures,

Hydrological models (Rational and Stanford IV) and hydrodynamic modeling / hydrodynamic modeling The HEC-RAS system, will be shown objectively. This review also aims to support a hydrological computational modeling of runoff processes and their influence on river floods, given the possibility of being able to characterize the impacts that climate changes and anthropic actions have had on the environment. In all regions of the planet, the quantification of the surface runoff and its relations with the urban floods, are of extreme importance.

Keywords: Computational modeling. Full. Flood. Flooding. Flooding. HEC-RAS. MOHID. Drainage network. Runoff. watershed management.

2.1 Introdução

A água é um recurso natural de uso comum, limitada e indispensável à manutenção da vida em nosso planeta. No entanto, o crescimento populacional acelerado e a crescente degradação da qualidade dos recursos hídricos, trazem insegurança quanto a sua disponibilidade (BERTONI; NETO, 2008). Por outro lado, não somente a carência, mas também a ocorrência de excessos de água torna-se preocupante (SANTOS, 2010).

O modelo matemático é a ferramenta que torna tais previsões e comparações possíveis, não é necessário implantar as obras previstas e esperar anos para avaliar seus efeitos – é possível fazer essas simulações hoje e comparar alternativas de concepção em diferentes cenários. Deste modo pode-se concluir que obras que visem mitigar e / ou aproveitar os efeitos das cheias são de extrema relevância para as diferentes sociedades e nos diferentes períodos históricos, pois compreendem ações de proteção ao ser humano e ao meio ambiente.

Em estudos envolvendo a modelagem de sistemas hídricos é fundamental uma boa estimativa da área das bacias hidrográficas e de seu sistema de drenagem. Uma das maneiras utilizadas para realizar essa estimativa é o levantamento topográfico por meios analógicos da área de interesse (TELLES; NETO; RODRIGUES, 2013a).

É considerada cheia a ocorrência de vazões relativamente grandes e que, normalmente, resultam em inundação das planícies fluviais ao extravasar a calha do rio. São processos naturais, com magnitudes definidas por um Tempo de Recorrência (TR). Sob uma ótica estocástica, cheias sempre existirão. Não existe uma solução ideal para controlar as inundações, tenta-se diminuir os riscos associados aos eventos de cheia com bons projetos de

drenagem, um exemplo, foi a quase destruição de Nova Orleans (EUA) em 2005, quando o furacão Katrina destruiu os diques de proteção da cidade contra alagamentos.

2.2 Revisão de literatura

2.2.1 Marco Legal

2.2.1.1 Legislação federal pertinente as cheias

O interesse pelas cheias de rios é preocupação relevante desde o período colonial. No início do século XX iniciaram-se as mudanças institucionais de gestão hídrica. Em 2012 foi aprovada uma lei federal que, dentre outras providências, obriga os municípios a elaborarem o mapeamento e a fiscalização das áreas de risco, organizarem e administrarem abrigos provisórios para assistência à população, em condições adequadas de higiene e segurança.

A gestão de recursos hídricos é regulada por considerações de segurança pública, econômicas e ambientais (PINHO, 2000). A palavra gestão tem como origem o Latim *Gestio:* ato de administrar, de gerenciar. Ao introduzir tal conceito na lógica de controle de cheias, há de se considerar os atores sociais envolvidos e afetados, os ecossistemas presentes na área de influência direta e indireta, além do interesse do capital na preservação de investimentos, o qual, geralmente, se impõe sobre os demais envolvidos em todo o processo.

> Torna-se assim indispensável para as pessoas compreenderem que elas são responsáveis por sua própria segurança e que não podem simplesmente limitar-se a esperar pelos governos para encontrar e prover soluções aos seus problemas. É necessário que haja uma vinculação entre as orientações das políticas nacionais e o uso de mecanismos que possam transformar os princípios da redução de desastres em atividades locais permanentes e flexíveis. (BRASIL, 2012, p. 49).

Como principal instrumento da legislação federal pertinente a cheias pode-se citar a Lei nº 13.308, de 6 de Julho de 2016 que altera a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007 e estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, determinando a manutenção preventiva das redes de drenagem pluvial e prevendo, no seu Art. 2º , disponibilidade em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes, adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado.

No Art. 3º desta mesma lei, considera-se que o saneamento básico inclui um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.

Cardoso e Feltrin (2011, p. 5) complementa, lembrando que:

> Para a minimização dos desastres, deve-se desenvolver uma planificação para emergências, ou seja, deve haver um planejamento urbano, a partir de Plano Diretor, com o intuito de controlar o desenvolvimento urbano, melhorando a qualidade de vida da população e garantindo a mitigação dos riscos e o melhor desempenho durante as operações de respostas em caso de desastres.

No estado do Amazonas uma lei[1] concede remissão de débitos do ICMS devidos por contribuintes estabelecidos nos municípios atingidos e/ou afetados pela enchente do exercício de 2014, em relação aos fatos geradores ocorridos até 31/3/2014. Verifica-se, dessa forma, que a problemática das cheias e inundações se revela na interface do ordenamento e ocupação territorial e da geomorfologia fluvial, com inevitáveis desdobramentos na gestão de recursos hídricos. Marco legal dentro do ordenamento jurídico ambiental brasileiro, a Política Nacional de Recursos Hídricos, promulgada pela Lei 9.433/1997, estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (BRASIL, 1997).

A PNRH criou, no mesmo dispositivo, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que garante a gestão compartilhada entre os governos e, principalmente, com a sociedade civil, no patamar de decisões dos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH) (BRASIL, 1997; BARRETO, 2009).

2.2.1.2 Legislação estadual pertinente a cheias

O Estado do Rio de Janeiro, a partir da implementação da sua legislação de Recursos Hídricos, adotou princípios e diretrizes de Gerenciamento dos Recursos Hídricos da sua dominialidade ou por delegação (em se tratando de águas de domínio da União), que orientam a sua ação gestora, no sentido da busca da sustentabilidade no uso desses recursos.

---

[1] AMAZONAS. Lei Nº 4.039, de 26 de maio de 2014, publicada no DOE de 26.05.14: "Autoriza o Poder Executivo a conceder remissão de créditos tributários do ICMS devidos por contribuintes estabelecidos nos municípios do interior do Estado do Amazonas, atingidos pelas cheias, na forma e condições que especifica".

Um dos eixos estratégicos fundamentais para o alcance desse objetivo é o exercício de planejamento. Através dele busca-se estabelecer caminhos de maior eficiência em relação ao uso, controle e proteção, de modo a permitir, se não o integral atendimento às demandas requeridas, em qualidade e quantidade, no tempo e no espaço, a maior efetividade do sistema nesse atendimento. O planejamento dos recursos hídricos é uma atividade que visa adequar o uso, controlar e proteger a água às demandas sociais e/ou governamentais, fornecendo subsídios para o gerenciamento dos mesmos (LANNA, 2004).

Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH):

Os CBH são organismos colegiados que compõem o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Dentre suas competências estão a aprovação do Plano de Recursos Hídricos, um dos principais instrumentos de gestão dos recursos hídricos previstos na Lei 9.433/1997 (BRASIL, 1997; INEA, 2013).

Criado por Decreto nº 34.243 de criação, o comitê de Bacia do Rio Macaé possui como área de atuação a totalidade das bacias hidrográficas dos rios Macaé, Jurubatiba, Imboassica e da lagoa de Imboassica (RIO DE JANEIRO, 2003). Com a interveniência da Secretaria de Estado do Ambiente (SEA), a elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras (PRH – Macaé/Ostras) decorreu de contrato específico firmado entre o Instituto Estadual do Ambiente - INEA, e o Consórcio Macaé/Ostras. Sua aprovação é de incumbência do Comitê de Bacia do Rio Macaé (INEA, 2013).

O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (PRH Macaé/Ostras, 2016) visou a obtenção de um diagnóstico da situação atual, a estruturação de um plano de recursos hídricos e o delineamento das intervenções necessárias para assegurar água em quantidade e qualidade necessária a seus usos múltiplos. Dos diversos relatórios que compõem o Plano, há destaque para o apêndice do Relatório de Cheias, cujo objetivo é apresentar a revisão do estudo de cheias da RH VIII, de forma a complementar o diagnóstico. O documento apresenta uma revisão dos principais estudos de cheias prévios realizados para a região (INEA, 2013).

2.2.2 Zonas inundáveis

Como vimos, é considerada enchente a ocorrência de vazões relativamente grandes e que normalmente resultam em inundação das planícies fluviais ao extravasar a calha do rio. A partir desta calha são traçadas três áreas (**Figura 1**) de inundação, de acordo com o risco de ocorrência. Através da modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica, são

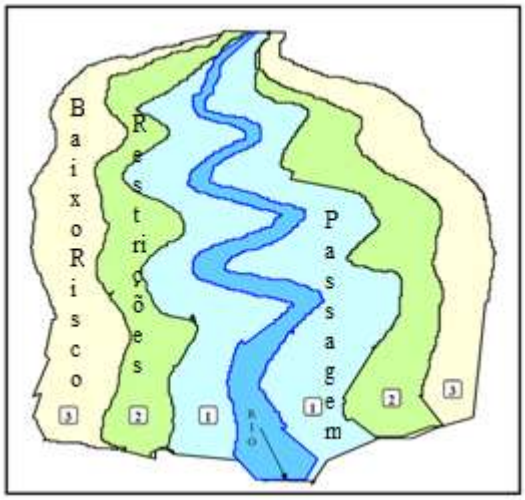
traçadas manchas de inundação para eventos com diferentes TR´s de 5, 10, 20, 50, 100 anos, ou até mais, como nos projetos de barragens e hidroelétricas, a partir dessas manchas, são formuladas diretrizes, regulamentos e normas legais de planejamento e uso do solo. (CORDERO et al., 1999 apud ENGLAND JR., et al., 2015).

Zona de passagem da enchente (faixa 1) – Esta parte da seção funciona hidraulicamente e permite o escoamento da enchente. Qualquer construção nessa área reduzirá a área de escoamento, elevando os níveis à montante desta seção. Portanto em qualquer planejamento urbano, deve-se procurar manter esta zona desobstruída.

Zona com restrições (faixa 2) – Esta é a área restante da superfície inundável que deve ser regulamentada. Esta zona fica inundada, mas, devido às pequenas profundidades e baixas velocidades, não contribuem muito para a drenagem da enchente.

Zona de baixo risco (faixa 3) – Esta zona possui pequena probabilidade de ocorrência de inundações, sendo atingida em anos excepcionais por pequenas lâminas de água e baixas velocidades. A definição dessa área é útil para informar a população sobre a grandeza do risco a que está sujeita. Esta área não necessita regulamentação, quanto às cheias, são escolhidas com base no risco que se deseja assumir na convivência com as enchentes.

Figura 1 – Regulamentação da zona inundável.



Fonte: Adaptado de TUCCI, 2009.

No Brasil, para a definição destas zonas, utilizam-se dados hidrológicos dos Sistemas de Alerta de Cheias, da ANA (*Hidroweb*), medições de descarga líquida e equações de chuvas intensas (CPRM e IDF) e também os Planos de Recursos Hídricos das Regiões. Na maioria dos municípios brasileiros há carência de estudos regionais que possam subsidiar planos diretores de recursos hídricos com vistas ao controle de cheias. Em Macaé, o Plano de

Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras em seu apêndice de Disponibilidade Hídrica, apresenta um estudo de vazões máximas para diversos pontos de interesse na bacia (INEA, 2013).

2.2.3 Classificação dos eventos de cheias

A água existente na Terra está distribuída em sua maior parte no mar, constituindo 97% do total, contrapondo os valores de água doce de apenas 3 %. Esta água doce está presente em maior parte nas geleiras (cerca de 71%), depósitos subterrâneos (18%), umidade do ar (4%), enquanto que apenas 7% está disponível nos lagos e cursos d´água (SPERLING, 2005). Em geral, o suprimento de água aos lagos e cursos d´água está relacionado com a distribuição de chuva na região, proporcionando o abastecimento de suas fontes - superficial ou subterrânea (BERTONI; NETO, 2008).

As enchentes e as inundações são fenômenos naturais que ocorrem no sudeste do Brasil principalmente no período das chuvas de verão, entre dezembro e março, época em que é comum a ocorrência de eventos de chuvas intensas, nos finais de tarde, ou prolongadas pela permanência de frentes frias durante três ou quatro dias, atingindo toda uma sub-bacia ou as regiões de cabeceiras de drenagem (SÃO PAULO, 2009).

Os alagamentos são acumulações temporárias de água em pontos com deficiência de escoamento superficial e as enxurradas podem ser entendidas como processos de escoamento concentrado das águas superficiais com alta energia de deslocamento (BRASIL, 2007).

Em geral os eventos de cheias são classificados em quatro categorias, definidas a seguir:

> **Inundação**: transbordamento de água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes ou acumulação de água por drenagem deficiente, em áreas não habitualmente submersas;
> **Enchente**: elevação do nível de água de um rio, acima de sua vazão normal, sendo normalmente sinônimo de inundação;
> **Enxurrada**: caracterizada por um volume de água que escoa na superfície do terreno, com grande velocidade, resultante de fortes chuvas;
> **Alagamento**: resultante do acúmulo de água no leito das ruas e no perímetro urbano, causado por fortes precipitações pluviométricas, em cidades com sistemas de drenagem deficientes. (BRASIL, 2013).

A ocorrência de inundações nos centros urbanos acarreta diferentes transtornos socioeconômicos. É possível minimizar os problemas quando estes eventos são previstos com antecedência. A partir de ferramentas computacionais, da modelação hidrológica e modelação hidrodinâmica, podem-se obter predições de níveis d´água (SILVA, 2006).

Por estes motivos, faz-se necessária uma maior compreensão sobre os fenômenos de cheias, em especial a quantificação das vazões máximas, que por sua vez, contribuem para subsidiar projetos de engenharia e oferecer suporte à gestão de recursos hídricos e ambientais no sentido de minimizar impactos decorrentes das cheias (SANTOS, 2010).

Sabe-se hoje que certas condições meteorológicas e hidrológicas propiciam a ocorrência de inundação. O conhecimento do comportamento meteorológico de longo prazo é muito pequeno devido ao grande número de fatores envolvidos nos fenômenos meteorológicos e à interdependência dos processos físicos a que a atmosfera terrestre está sujeita. Ainda, as condições hidrológicas que produzem a inundação podem ser naturais e artificias (CORDERO; MEDEIROS; TERAN, 1999). Tudo começa com o ciclo hidrológico.

2.2.4 Ciclo Hidrológico

Para se compreender o fenômeno das cheias, é fundamental o conhecimento do ciclo hidrológico e dos fatores que a provocam. O ciclo hidrológico ou ciclo da água, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes (MMA).

Iniciada a precipitação pluviométrica, parte dela é interceptada pela vegetação, parte infiltra no solo e parte pode ser retida em depressões da superfície do terreno. Se a duração da chuva continuar, após o preenchimento dessas depressões, terá início o escoamento superficial propriamente dito. Assim, a água que escoa sob a superfície do solo, sem infiltrar, formará a enxurrada que irá compor, junto com o escoamento de base, os córregos, ribeirões, rios, lagos e reservatórios (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

2.2.5 Principais componentes de interesse do Ciclo Hidrológico

Os principais componentes de importância no ciclo hidrológico para este estudo são a interceptação vegetal, infiltração, tipo do solo, escoamento superficial e os normais climatológicos: temperatura, umidade relativa e a precipitação, esta é a fonte de água que origina o ponto de partida para todas as análises hidrológicas de sub-bacias hidrográficas. Existe nas formas de chuva, granizo e neve. As principais características pelas quais se pode identificar uma chuva são: quantidade ou volume total em mm ou m^3, duração em minutos ou horas, intensidade (quantidade/tempo) em mm/h.

2.2.5.1 Interceptação vegetal

Refere-se a coleta de chuva sobre a superfície das plantas. Pode atingir até 25% da precipitação anual total. Os fatores que mais influenciam na quantidade de água interceptada são: tipo de vegetação, densidade da vegetação, estágio de crescimento, estação do ano e velocidade do vento.

2.2.5.2 Infiltração

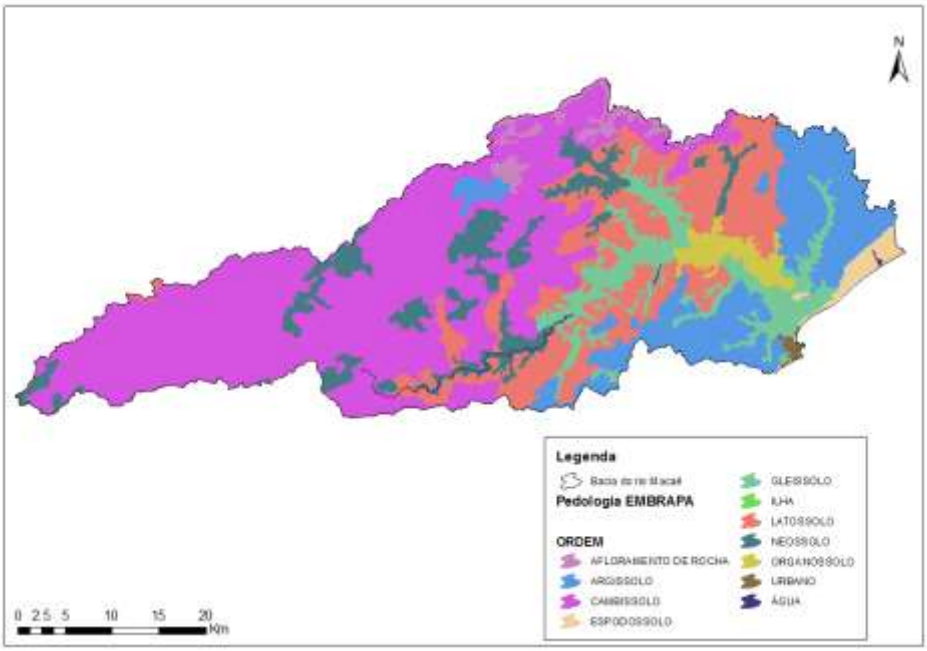
Refere-se a entrada de água pela superfície do solo. Os fatores que afetam a infiltração da água no solo são: tipo de solo, crosta superficial, selamento superficial, umidade do solo antes da chuva, duração e intensidade da chuva.

Existem diversos modelos que correlacionam dados de precipitações com valores de vazões, os chamados modelos chuva-vazão. De acordo com Azevedo et al. (1997), a técnica de modelagem matemática permite que qualquer problema seja representado através de algoritmos computacionais, onde a complexidade do equacionamento é proporcional ao nível desejado de precisão e detalhamento.

2.2.5.3 Tipo do Solo

A caracterização da bacia, quanto aos tipos de solo (**Figura 2**), é fundamental para compreensão dos fenômenos de cheia. Solos profundos e drenantes permitem maior e mais rápida infiltração, de modo a atenuar o escoamento superficial, enquanto solos rasos ou mais impermeáveis propiciam maior escoamento superficial direto (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005).

Figura 2 – Pedologia da bacia do rio Macaé.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA SOLOS, 2009.

Segundo o Plano de Bacia Macaé / Ostras (2016), solos são materiais minerais e/ou orgânicos, dispostos em camadas ou horizontes na superfície superior do terreno, resultantes da decomposição das rochas ou dos restos de vegetais. A decomposição das rochas se dá através de agentes físicos, como a temperatura; químicos, como a ação da água produzindo a hidrólise dos minerais; e biológicos, como a ação dos microrganismos. Foram identificadas 21 unidades de mapeamento de solos na Região Hidrográfica do Macaé e das Ostras (RH-VIII).

Para caracterização da pedologia da bacia do rio Macaé, é apresentado o mapa da EMBRAPA (2009) para os solos do estado do Rio de Janeiro, elaborado em escala 1:100.000. O site da EMBRAPA – Solos disponibiliza dados sobre todos os tipos de solos brasileiros.

Geomorfologicamente, a transição do domínio de Escarpas Serranas para Planícies Fluviais gera uma heterogeneidade de ambientes que permite que se estabeleçam, ao longo da bacia, diferentes tipos de canais, com padrões de escoamento e descarga de sedimentos diversificados (LIMA; MARÇAL, 2013).

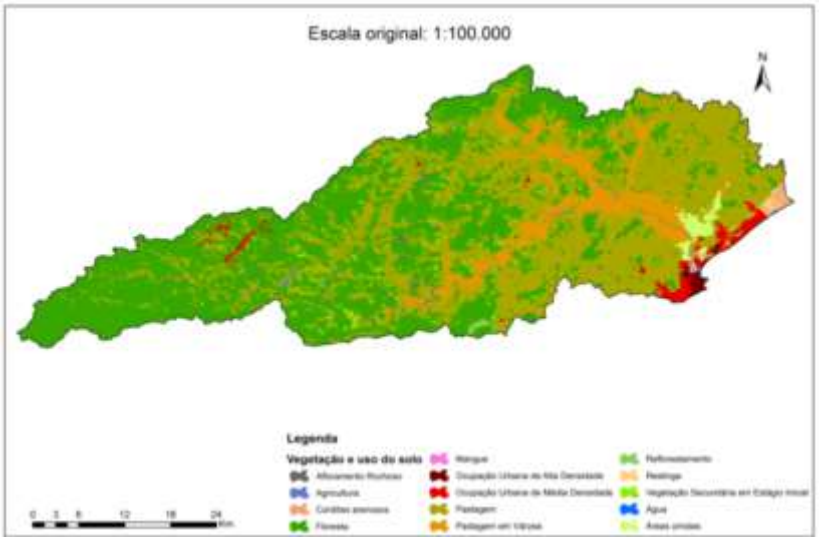
O trabalho de Amaral (2003) reforça o fato de que a gestão de recursos hídricos em áreas costeiras deve abraçar, não somente, os fenômenos precipitação, evapotranspiração e vazão, mas também o estudo e o monitoramento hidrossedimentológico da costa.

2.2.5.4 Ocupação Urbana

A ocupação urbana é responsável pela alteração da cobertura natural do solo, aumentando a parcela da precipitação que escoa diretamente para a calha fluvial, gerando de fato o hidrograma de cheia. Ela altera também o tempo de concentração da bacia, tornando a resposta à precipitação intensa mais rápida (TUCCI; CLARKE, 1997).

Segundo Barboza (2014), a ocupação urbana (Figura 3) se dá majoritariamente nas proximidades da foz do rio Macaé, onde se situa o núcleo urbano da cidade de Macaé. Alguns aglomerados urbanos são representados no mapa, como é o caso dos distritos de Lumiar e São Pedro da Serra - no município de Nova Friburgo - e Sana e Frade - no município de Macaé. Outras localidades, por conta do reduzido tamanho ou baixa taxa de urbanização, não são representadas: Cascata (município de Nova Friburgo), Cachoeiros, Bicuda Grande, Areia Branca e Iriri (município de Macaé).

Figura 3 –Mapa de Uso do Solo da bacia do rio Macaé.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA SOLOS, 2009.

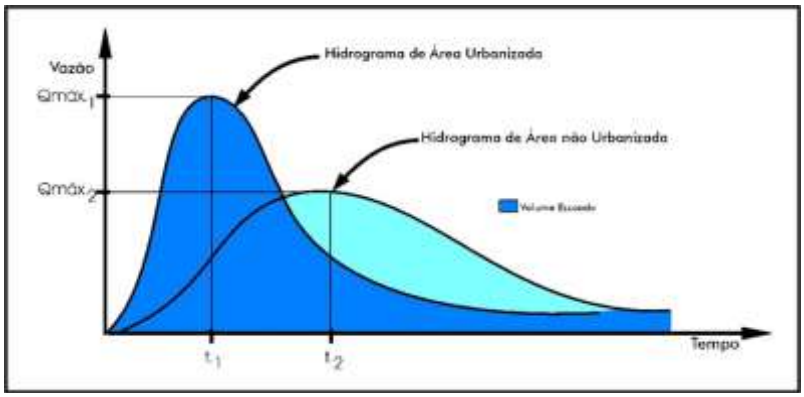
A ocorrência de enchentes em períodos de chuvas intensas é um fenômeno natural e cíclico em uma bacia hidrográfica (SANTOS, 2010). Ainda assim, tais ocorrências acarretam em danos às cidades, graças à ausência de planejamento urbano e ordenação da ocupação, o que acaba por permitir a ocupação de margens e áreas de inundação. Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações. A ocupação da várzea pode ser para habitação, recreação, uso

agrícola, comercial ou industrial. Os problemas das enchentes e das erosões são de ordem mundial (CORDERO; MEDEIROS; TERAN, 1999).

A expansão das áreas urbanas, gerando desmatamento seguido da substituição da cobertura vegetal por superfícies, provocam drástica redução da infiltração da água no solo e consequente aumento do escoamento superficial direto, fator de grande influência no incremento de inundações no meio urbano.

Para casos extremos, verifica-se nos hidrogramas comparativos (**Gráfico 1**) que o $Qmax_1$ – vazão de pico para áreas urbanizadas e o $Qmax_2$ – vazão de pico para áreas não urbanizadas, apresentam diferenças que podem chegar a ser 6 (seis) vezes maior do que o pico desta mesma bacia em condições naturais.

Gráfico 1 – Hidrograma de área urbanizada e não urbanizada.



Fonte: Adaptado de TUCCI, 1995.

Tais processos geram impactos que alteram profundamente o balanço hídrico, traduzindo-se em aumento das vazões de pico. A impermeabilização do solo através de construção de telhados, ruas, calçadas e pátios diminui a infiltração e aumenta o escoamento superficial. Da mesma forma, com a urbanização, o volume de água que escoava de maneira gradual e era absorvido pelas plantas, passa a escoar diretamente no canal fluvial, demandando uma maior capacidade de escoamento das seções das tubulações (TUCCI, 1995).

2.2.5.5 Escoamento Superficial

O volume total de água transportado pelo canal de um curso de água é formado pelo escoamento superficial e pelo afluxo de água do subsolo, ou escoamento de base. No entanto, o escoamento superficial resultante das precipitações é considerado o componente

preponderante na formação de cheias ou aumento de vazões dos cursos de água (PINTO; HOLTZ; MARTINS, 1973).

2.2.5.6 Normais Climatológicas (temperatura, precipitação e umidade relativa)

Chuvas intensas são aquelas que registram um grande volume de água precipitado em um curto espaço de tempo. Essas chuvas, frequentemente, causam prejuízos materiais e humanos consideráveis e são as grandes responsáveis pelas grandes cheias observadas na calha fluvial de um rio (SANTOS, 2010). A intensidade da chuva, compreendida como a razão entre a altura de lâmina d'água precipitada e o tempo, é geralmente expressa em mm/h e pode ser medida em pluviógrafos manuais ou telemétricos (CARVALHO JR, 2013).

Normais climatológicas são os dados mais importantes no estudo do fenômeno das cheias e são anotados em forma de tabela para cada estação de monitoramento de um dado rio ou canal. São eles: temperaturas (mínima, máxima e média), Precipitação Total e Umidade Relativa.

A precipitação efetiva se propaga pela superfície da bacia até atingir os cursos d'água, através dos quais é conduzida para jusante (CARVALHO JR, 2013).

2.2.6 Métodos e Modelos para estudo de cheias

2.2.6.1 Métodos estatísticos

Os métodos estatísticos determinam a frequência de cheias futuras a partir do registro de cheias passadas. Recomenda-se a aplicação de métodos probabilísticos na presença de dados fluviométricos adequados, de série histórica considerável, pois, neste caso, o hidrólogo não incorre ao erro da transformação de chuva em vazão. Na aplicação de modelos probabilísticos, quanto maior é a série, maior a segurança do modelo, uma vez que os eventos extremos, como as grandes vazões, estão diretamente relacionados ao período de retorno (SANTOS, 2010).

A SUDERHSA (2002) aponta ainda que os valores obtidos nestes modelos são sempre aproximados, devido às incertezas hidrológicas, às simplificações dos métodos e aos critérios adotados. Portanto, quanto mais meticulosos e sistemáticos forem os procedimentos adotados, menor será a probabilidade de ocorrência de erros comprometedores.

2.2.6.2 Método Racional

O Método Racional consiste no cálculo da descarga máxima de uma enchente de projeto por uma expressão bem simples, relacionando o valor da descarga máxima com a área da bacia de contribuição e a intensidade da precipitação (BRASIL, 2005).

O Método Racional é usualmente utilizado para estimar a vazão de pico durante uma cheia extrema em locais com áreas de drenagem iguais ou inferiores a 2 km² (CARVALHO JR, 2013). Portanto, esse é o método utilizado em cabeceiras de rios e em pequenos afluentes, onde geralmente não há monitoramento hidrológico.

DNIT (2005) afirma ainda que, pela sua extrema simplicidade, o Método Racional é amplamente utilizado em projetos de drenagem, não só no Brasil, mas em todo o mundo, principalmente em bacias de pequeno porte e áreas urbanas.

Segundo Santos (2010), os resultados deste método são geralmente satisfatórios, desde que seja utilizado dentro dos seus limites de validade. O Método Racional é expresso pela equação (1):

$$\mathbf{Q = 0{,}278.C.i.A} \qquad (1)$$

Onde *Q* é a vazão de pico (em m³/s), *C* é o coeficiente de escoamento (adimensional), *i* é a intensidade máxima média de precipitação (em mm/h) e *A* é a área da bacia (em km²). O coeficiente 0,278 é uma constante para adequação das unidades utilizadas. Este valor pode variar em função das unidades adotadas no cálculo.

Delimitada a área de contribuição e adotada uma intensidade de precipitação para o local, o coeficiente de escoamento *C*, também chamado de coeficiente de *runoff*, é um valor adimensional definido como a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado. O valor de *C* depende fundamentalmente das características fisiográficas da bacia (declividade, tipo e uso de solo) e é geralmente obtido a partir da média ponderada dos valores de *C* de cada superfície, pelas suas respectivas áreas no interior da bacia em estudo (DNIT, 2005).

Uma restrição deste método é que ele não leva em consideração que as condições de permeabilidade do terreno variam durante a precipitação no sentido de aumentar o escoamento superficial. Este método também não considera o retardamento natural do escoamento cujo fenômeno acarreta alteração no pico de cheia, sendo esta a principal razão da limitação da aplicação deste método para bacias maiores. Outra restrição deste método é que

ele considera a intensidade de chuva constante em todos os pontos da bacia durante o tempo de concentração calculado. Ainda assim, estas simplificações não impedem sua aplicação em sub-bacias, já que as alterações devido a estas simplificações se tornam desprezíveis (CARVALHO JR, 2013).

2.2.6.3 Estudos hidrológicos de vazões máximas

Os estudos hidrológicos de vazões máximas são realizados visando maior entendimento do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Isto é, determina-se para diversos tempos de recorrência as vazões máximas de cheia, de modo a subsidiar planos de bacias, projetos de micro e macrodrenagem, sistemas de alertas, barragens e outros projetos afins (TUCCI, 2004; SANTOS, 2010).

Ainda, segundo Tucci (2004), a estimativa de vazões máximas possui importância fundamental na determinação dos custos e da segurança dos projetos de engenharia.

O objetivo final é determinar vazões instantâneas de pico para diversos tempos de recorrência nas estações fluviométricas distribuídas na bacia de um rio ou canal e também para a foz de rios (zona estuarina), comumente, onde se situa o núcleo urbano da cidade. Normalmente aplica-se o Método do Hidrograma Unitário Triangular do U.S. *Soil Conservation Service*. Para as estações com longas séries de dados fluviométricos são feitos, também, ajustes estatísticos para determinação destas vazões de referência, que servirão de comparação.

Os resultados encontrados serão comparados com outros estudos de vazões máximas, realizados na bacia hidrográfica para análise da aplicação do método em bacias de rios e / ou canais com ausência ou baixa disponibilidade de dados fluviométricos.

Como objetivos específicos, este estudo se propõe, no futuro, fazer a:

a) Caracterização da bacia do rio Macaé e estudo particular de canal ligado a ele;
b) Tratamento de dados hidrológicos do *Hidroweb*;
c) Determinação de vazões máximas para diferentes tempos de retorno através do ajuste de distribuições estatísticas;
d) Pesquisa de Equações de Chuvas Intensas definidas para a região;
e) Comparação dos resultados obtidos com demais estudos hidrológicos de vazões extremas realizados na bacia.

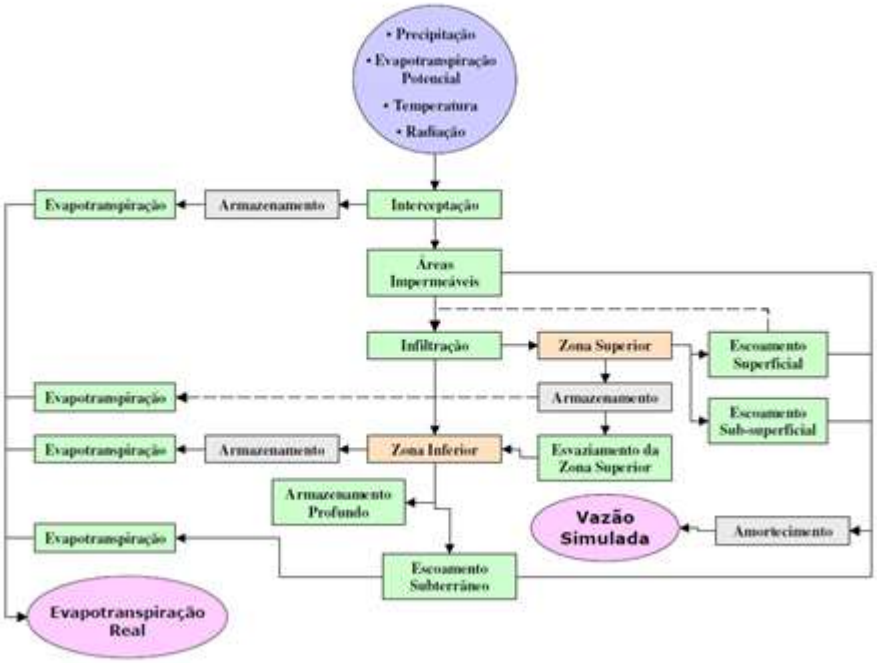
O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé - Ostras, em seu apêndice de disponibilidade Hídrica, apresenta um estudo de vazões máximas para diversos

pontos de interesse na bacia (INEA, 2013). Além deste, outros estudos de vazões máximas na bacia do rio Macaé serão apresentados e utilizados como base de comparação para os resultados obtidos neste trabalho.

2.2.6.4 Modelos Hidrológicos

Diversos são os modelos hidrológicos existentes no mercado. O fluxograma apresentado (**Figura 4**) ilustra os processos considerados nos cálculos do modelo Stanford IV.

Figura 4 – Fluxograma adaptado do modelo Stanford IV.



Fonte: Adaptado de LINSLEY et al., 1975.

2.2.6.5 Modelos de Simulação

Os modelos de simulação procuram descrever o meio ou os processos físicos através da adoção de um sistema simplificado com comportamento semelhante ao do protótipo, ou seja, do sistema real (TUCCI, 2004).

Como exemplo de Modelos de Simulação para cheias cita-se o MOHID, ele calcula o nível do rio ou canal sobre uma grade regular estruturada em função da vazão e declividade do terreno, possibilitando a obtenção de um mapa de inundação. O nível é calculado pelas equações de energia, o escoamento é calculado pela equação de *Manning* e a drenagem é

calculada utilizando a abordagem onda cinemática (ITL). O MOHID é projetado para simular a bacia hidrográfica. Algumas classes desenvolvidas estão relacionadas com processos específicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica. Exemplos: Hidrodinâmica, Transporte de sedimentos e Qualidade da água.

Neste trabalho foi implementado um sistema de modelagem integrada para simular o efeito das ondas de cheias no Estuário do Rio Espírito Santo na Baía Maputo (Moçambique), considerando as vazões no rio e a maré astronômica. Após execução do modelo, veem-se as zonas susceptíveis de serem inundadas.

Outro modelo que pode ser citado como exemplo é o HEC-RAS, ele possui vínculo com o HEC-HMS pelo módulo precipitação, permitindo gestão da bacia e simulação de inundações. O REC-HAS atualmente é aplicado a diversas bacias no âmbito mundial, devido a sua simplicidade e rápida obtenção de resultados.

2.2.7 Medidas para Controle de Cheias

Medidas para controle de cheias dividem-se em estruturais e não estruturais. As primeiras referem-se às intervenções físicas que alteram a estrutura da bacia, seja na sua extensão (medidas extensivas) ou em obras pontuais (medidas intensivas). Exemplos de medidas estruturais são: reservatórios, retificações, reflorestamento e outras. As medidas não estruturais consistem na busca da melhor convivência do homem com o fenômeno das cheias. Exemplos de medidas não estruturais são: sistemas de alerta, sistemas de resposta, mapas de inundação e outras (CORDERO; MEDEIROS; TERAN, 1999).

Já as medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes. São elas: a regulamentação do uso da terra ou zoneamento de áreas inundáveis, em consonância com o Plano Diretor da cidade; a construção à prova de enchente, conjunto de medidas para reduzir a perda de edificações localizados nas várzeas de inundação; o seguro contra enchentes, uma proteção econômica para as perdas eventuais; e a previsão e alerta, que é um sistema de aquisição, transmissão de dados e previsão das cheias, geralmente de atribuição da Defesa Civil (TUCCI, 1997).

A concepção tradicional, no entanto, vem aos poucos sendo complementada. Dentre as novas técnicas desenvolvidas, as chamadas Medidas Compensatórias.

Surgidas a partir da década de 1970, visam à retenção das águas de chuva e à retomada de fenômenos naturais do ciclo hidrológico, como a infiltração de água no solo (MIGUEZ *et al*, 2015).

Tominaga (2013) analisou o efeito de amortecimento do pico de cheias pela implantação de medidas compensatórias, através do modelo SWMM, na cidade de São Paulo. Dentre as medidas simuladas, o amortecimento do pico de cheia foi verificado em todos os 209 cenários analisados. Os maiores valores de amortecimento foram verificados para precipitações com período de retorno menor, como de 2 anos. O maior abatimento do pico de cheias foi verificado para precipitações com duração de 30 minutos, correspondente à duração da chuva crítica na bacia. O pavimento permeável apresentou um dos maiores desempenhos no abatimento do pico de cheia.

Outras técnicas de Drenagem Ambiental visam resgatar as características naturais do ciclo hidrológico através de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto como a *Low Impact Development* (LID) que adota um conjunto de procedimentos que tentam compreender e reproduzir o comportamento hidrológico anterior à urbanização, por exemplo, recuperando as características de infiltração e detenção da bacia natural, procurando imitar as funções hidrológicas da bacia natural, envolvendo volume, vazão, recarga e tempos de concentração, fazendo uso de técnicas compensatórias simples, tais como:

a) Jardim de chuva: canteiros rebaixados com árvores e flores formando pequeno reservatório com ótimos resultados para o controle de inundações e para o paisagismo;
b) Trincheira de Infiltração, que pode, inclusive, estar associada aos Jardins de Chuva. As trincheiras são estruturas longitudinais construídas para facilitar a infiltração das águas pluviais;
c) Pavimento Permeável, que como o próprio nome diz, é construído com materiais permeáveis, possibilitando a infiltração da água, ex.: estacionamentos e ruas com pouco movimento;
d) Poço de Infiltração, buraco preenchido com camadas de pedras de diferentes tamanhos e uma depressão em relação ao nível do terreno vizinho;
e) Tetos Verdes, efeito tímido no controle de enchentes, reduz a temperatura interna das edificações, retira gases do efeito estufa e diminui conta de luz;
f) Paredes verdes;
g) Projeto de reassentamento de famílias que vivem em áreas de risco de inundação.

2.2.8 Tempo de Retorno para diferentes tipos de obra

Santos (2010) sintetiza os períodos (tempos) de retorno exigidos para diferentes obras hidráulicas apresentadas (**Tabela 1)**.

Tabela 1 – Tempos de Retorno (TR) exigidos para diferentes projetos hidráulicos.

Obra Hidráulica	Tempo de Retorno (anos)
Bueiros	2 a 10
Galeria de águas pluviais	5 a 20
Pequenas barragens de concreto para abastecimento de água	50 a 100
Canalização a céu aberto trapezoidal	50
Canalização a céu aberto retangular	100
Travessias: pontes, bueiros e estruturas afins	100
Barragem de concreto	500
Extravasor de uma barragem de terra	1000
Vertedor de grandes barragens	10.000

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2010.

Percebe-se que o tempo de recorrência requerido para uma obra ou um projeto está diretamente ligado à sua relevância, ao nível de segurança das estruturas e, também, aos custos envolvidos.

2.2.9 Monitoramento e modelagem hidrológica na bacia

Existem dois tipos de atividades na hidrologia: monitoramento e modelagem. A observação ou medição contínua de processos chama-se monitoramento. A diferença entre o monitoramento e o diagnóstico é que o primeiro possui a atividade contínua e o segundo normalmente não. Na natureza, os experimentos são realizados em tempo real e em escala real, e o monitoramento neste caso busca obter e interpretar dados. Tratando-se de processos de grande complexidade, como os encontrados em bacias hidrográficas, podem existir sérias dificuldades em criar um modelo. Neste caso, primeiro pode-se fazer o monitoramento e os resultados obtidos possibilitarão ou auxiliarão na modelagem (GPDEN / IPH / UFRGS, 2015).

O sistema de modelagem deve auxiliar no processo de tomada de decisões através da apresentação e análise de alternativas estratégicas de planejamento baseadas nos resultados das simulações. O sistema deve utilizar uma abordagem orientada a objetos, permitir a modularidade e o encapsulamento de informações e, de maneira mais adequada, possibilitar a expansão, a alteração e a inserção de outros modelos **(**COGERH, 2012**)**.

Como exemplo de um sistema de monitoramento hidrológico podemos citar o Sistema de Alerta de Cheias do INEA no estado do Rio de Janeiro que é equipado com sensores telemétricos que fornecem os dados em intervalos de 15 minutos. Das oito, cinco estações -

Barra do Sana, Fazenda Airis, Ponte do Baião, São Pedro e Galdinópolis - foram implantadas no contexto do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento mantido pela UENF na bacia do rio Macaé (ECOLOGUS, HICON, UENF, 2013). As estações Piller, Macaé de Cima e Glicério tiveram os sistemas telemétricos instalados em 2012, num segundo projeto P&D, também mantido pela (ECOLOGUS, HICON, UENF, 2013).

As estações com dados disponíveis, suas respectivas datas de início de operação e a altitude de referência estão em funcionamento.

2.2.10 Mapeamento de Áreas de Risco para Prevenção de Desastres Hidrológicos

Na última década, os desastres hidrológicos vêm ocorrendo com maior frequência e severidade no Brasil. Por isso, é necessário que se busquem medidas no sentido de reduzir a ocorrência e os impactos de tais desastres. O mapeamento de áreas de risco é extremamente importante nesse processo e possui custo comparativamente reduzido e elevada eficiência. Em contraponto, existem poucos técnicos qualificados para desenvolver adequadamente este tipo de mapeamento (GPDEN / IPH / UFRGS, 2015).

A criação de grupos profissionais e voluntariado capacitados em Mapeamento de Áreas de Risco para Prevenção de Desastres Hidrológicos com Ênfase em Modelagem Hidrogeomorfológica, tem sido uma constante em todo o mundo. Nesta capacitação é fornecida aos técnicos do setor de gerenciamento de desastres naturais, os conhecimentos necessários para realizar o mapeamento de áreas de risco de desastres naturais, com ênfase em desastres hidrológicos (inundação, escorregamento, e fluxo de detritos).

2.2.11 Estudos Preliminares das Cheias e Inundações na Bacia do Rio Macaé

Caracterização: A bacia do rio Macaé se caracteriza por uma grande diferença de altitude entre a parte alta (rochosa) e a parte baixa da bacia (até 65 km da foz) com leito arenoso. O principal afluente é o rio São Pedro, no que se refere às cheias, tanto a bacia do rio Macaé como a bacia do rio São Pedro pode ser dividida em duas zonas: uma zona de formação das cheias e uma zona de dissipação ou inundação.

Causas de Enchentes: As enchentes no rio Macaé são causadas por chuvas intensas, com duração de algumas horas, até um ou dois dias, concentradas principalmente na parte alta da bacia.

Estudo de Regionalização de Vazão da CPRM: Estudo de regionalização de vazão da bacia 59 (ANA), desenvolvido pela CPRM **(CPRM, 2002)**. O trabalho sugere uma equação de regionalização ($Qmc = 0,3865.A^{1,0259)}$. Este tipo de estudo baseia-se no método racional que não é aplicável a bacias maiores, como no caso da bacia hidrográfica do rio Macaé que possui 1714 Km^2.

Vazões Máximas Estimadas no Projeto, **FGV (2004)**: Sugeriu a construção de uma barragem de (reservatório) contenção de cheias no rio Macaé, a montante da ponte do Baião, no cruzamento da estrada RJ-162 com o rio Macaé (22°23'17"S 42°4'55"W), dragagem do leito no trecho final do rio (poderia reduzir os níveis de cheia em cerca de 20 cm), e construção de diques em torno das áreas baixas habitadas, formando um pôlder.

Estudo de Modelagem do Estuário do Rio Macaé, **Amaral (2003)**: Analisou o escoamento do trecho final do rio Macaé com vazão de "cheia" e combinado com o efeito da maré de sizígia. A maré meteorológica pode aumentar os níveis do rio Macaé de 0,9 para 1,2 metros (diferença de 30 cm) no trecho do rio próximo à zona urbana do município. Os resultados de Amaral (2003) demonstram a forte influência da maré na região da foz do rio Macaé que não pode ser desprezado em estudos de cheias neste rio.

2.3 Resultados e discussão

Pelo que se pode ver, existem ações naturais como as chuvas intensas, com duração de algumas horas, até um ou dois dias, concentradas principalmente na parte alta da bacia, juntando-se à grande declividade do médio e alto curso em detrimento das pequenas declividades do baixo curso e antrópicas que agravam a formação das enchentes do rio Macaé. Como principais ações antrópicas no agravamento das cheias, foram citadas:

a) A urbanização intensa dos terrenos com pavimentação, gerando impermeabilização do solo com aumento considerável no escoamento superficial (*runoff*) e redução das infiltrações (*shallow e deep infiltration*) e redução da evapotranspiração (*evapotranspiration*);
b) Avanço da ocupação territorial sobre áreas sujeitas à inundação;
c) Desmatamento em grande escala e
d) Obras locais de caráter imediatista.

Conclui-se que a modelagem computacional hidrológica dos processos de escoamento superficial (*run off*), infiltração em bacias hidrográficas, marés e sua influência sobre as

cheias de rios, apresenta-se como uma solução atraente na mitigação dos efeitos das enchentes urbanas.

2.4 Conclusões

A intenção deste trabalho foi apresentar os fatores relevantes e aplicações de modelos para o controle de cheias acompanhados de alguns exemplos práticos. De forma geral as medidas de controle foram classificadas em duas categorias: estrutural e não-estrutural.

As metodologias de modelagem apresentadas permitem sobrepor os processos de larga escala com os de escala local, nomeadamente o aumento do nível no estuário numa situação de cheia. Com as informações sobre determinada região reunidas, espera-se obter resultados através da modelagem, que contribuirão para criação de um Sistema de Informações de Recursos Hídricos da bacia de um rio e ações, tais como:

a) Melhoria significativa da previsão das épocas mais prováveis de ocorrerem enchentes em função das marés meteorológicas e vazão do rio, gerando alertas para a Defesa Civil;
b) Suporte à criação (ou melhoria) de Legislação de uso e ocupação do solo que contemple as particularidades do relevo da cidade no que tange a ocorrência de inundações;
c) Informações de apoio a projetos de macro e micro drenagem;
d) Aumento de uso das técnicas compensatórias simples apresentadas, através da realização de estudos básicos sobre fenômenos que causam desastres naturais e sobre medidas não-estruturais para reduzir tais desastres em bacias hidrográficas;
e) Divulgação dos resultados dos estudos e promoção da conscientização da população.

Vale ratificar que a atual situação do território de muitos países, inclusive do Brasil, evidenciam claramente como muitos casos de intervenções executadas no passado, nas calhas dos rios, têm modificado gradualmente as características geomorfológicas e hidráulicas dos rios, tais como: a declividade, a seção, o andamento planimétrico, as vazões, os níveis e a velocidade. As modificações ocorridas com a vegetação das margens dos rios e das características físico-químicas das águas tem causado muitas vezes a destruição ou a degradação ambiental, e a substituição da paisagem natural por outra artificial, ecologicamente empobrecida.

REFERÊNCIAS

AMARAL, K. J. **Estuário do rio Macaé:** modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2003.

AMAZONAS. Lei Nº 4.039, de 26 de maio de 2014. **Autoriza o Poder Executivo a conceder remissão de créditos tributários do ICMS devidos por contribuintes estabelecidos nos municípios do interior do Estado do Amazonas, atingidos pelas cheias, na forma e condições que especifica.** DOE de 26 maio 2014: Disponível em: <http://www.sefaz.am.gov.br/Areas/OpcaoSistemas/SILT/Normas/Legisla%E7%E3o%20Estadual/Lei%20Estadual/Ano%202014/Arquivos/LE%204.039_14.htm>. Acesso em: 14 jul. 2015.

BARNARD, T. E. et al. Evolution of an Integrated 1D/2D Modeling Package for Urban Drainage. In: JAMES, Williametal. (Comp**.). Contemporary Modeling of Urban Water Systems.** Guelph, On Canada: Computational Hydraulics International, 2007. Cap. 18, p. 343-365.

BARRETO, G. S. **Mapeamento ambiental da bacia hidrográfica da lagoa Imboacica:** subsídio para a construção de planos de bacia. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental modalidade profissional) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2009.

BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação do Solo.** 6. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2008.

BRASIL. **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais.** Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres - CENAD. Brasília, 2013.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 133p.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012: **Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em: 13 jul. 2015.

BRASIL. Lei nº 13.308, de 6 de Julho de 2016. **Altera a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, determinando a manutenção preventiva das redes de drenagem pluvial.** Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13308.htm>. Acesso em: 23 ago. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.433. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e dá outras providências.** Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios.** CARVALHO, Celso Santos; MACEDO, Eduardo Soares de; OGURA, Agostinho Tadashi (Org.s) Brasília: Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p. ISBN 978-85-60133-81-9.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** 2. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2014.

CARDOSO, M. R. B.; FELTRIN, T. F. Planejamento da infra estrutura de transporte urbano visando contingências emergenciais. In: **Congresso ANPET.** 2011.

CARVALHO JR, M. M. **Metodologia para Determinação das Áreas de Preservação Permanente das Margens de Cursos D'água:** Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Piabanha. 2013. 126 f. Dissertação (M. Sc.) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology,** McGraw Hill, 1988.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGRAW-HILL Book Company, 1959. 680p.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará. **Termo de Referência para elaboração dos estudos de requalificação das ações de gerenciamento da alocação de água nas bacias hidrográficas do Acaraú e Coreaú e controle de cheias nas bacias do Jaguaribe, Acaraú e Coreaú.** 2012.

CORDERO, A., MEDEIROS, P. A.; TERAN, A. L. **Medidas de Controle de Cheias e Erosões.** Centro de Operação do Sistema de Alerta. Universidade Regional de Blumenau. Santa Catarina, 1999. Disponível em: <http://ceops.furb.br/index.php/publicacoes/artigos/doc_details/5-metodos-controle-cheias-1999>. Acesso em: 26 abr. 2015.

EMBRAPA SOLOS. **Mapas de Pedologia do estado do Rio de Janeiro.** 331 p. (Embrapa Solos. Documentos, 105), 2009.

GPDEN / IPH / UFRGS - Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). **II Curso de Capacitação em Mapeamento de Áreas de Risco para Prevenção de Desastres Hidrológicos com Ênfase em Modelagem Hidrogeomorfológica.** Out. 2015.

ECOLOGUS, HICON, UENF, 2013, **Relatório do Monitoramento Hidrossedimentológico.** Projeto P&D - Sistema para Previsão de Vazões e Elaboração de Prognósticos sobre Disponibilidade Hídrica e Assoreamento na Bacia do Rio Macaé.

ENGLAND JR., J. F. et al. **Guidelines for Determining Flood Flow Frequency** – Bulletin 17C. USGS – U. S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2015. 170p.

INEA. **Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04) – Apêndice.** Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras. Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

LANNA, A. E. Gestão dos Recursos Hídricos. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia:** ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ ABRH/ EDUSP, 2004. p.727-768.

LIMA, R. N. S.; MARÇAL, M. S. Avaliação da Condição Geomorfológica da Bacia do rio Macaé RJ a partir da Metodologia de Classificação dos Estilos Fluviais**. Revista Brasileira de Geomorfologia,** v. 14, p. 171-179, 2013.

LINSLEY JR., R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers.** New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1975.

MALHADAS, M. S. et al. Sistema integrado de simulação de cheias no Estuário do Espírito Santo (Baía de Maputo, Moçambique). **2°Jornada de Engenharia Hidrográfica,** Porto Salvo: HIDROMOD, Lisboa: IST-Maretec, 2012.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana:** do projeto tradicional à sustentabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro: Ed Elsevier, 2015.

NERY, J. T.; BALDO, M. C.; MARTINS, M. L. O. F. O comportamento da precipitação na Bacia do Itajaí, **Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá,** Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, 2000.

PINHO, José L. S. **Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras.** 2000. 339 f. Tese (doutoramento em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Portugal, 2000.

PINTO, N. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. **Hidrologia de superfície.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 179p.

PLANO DE BACIA MACAÉ / OSTRAS. Disponível em: <http://www.planomacaeostras.com/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=43>. Acesso em: 11 jul. 2016

REICHARDT, K. **A água nos sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987. 188p.

RIO DE JANEIRO. **Decreto Estadual nº 34.243 de 04 de novembro de 2003, que cria o Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Macaé e das Ostras**. 2003.

SANTOS, L. C. C. **Estimativa de Vazões Máximas de Projeto por Modelos Determinísticos e Probabilísticos.** 2010. 173 f. Dissertação (M. Sc.) – PPGEA/UFES, Espírito Santo, 2010.

SÃO PAULO. **Diretrizes Básicas para projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo.** Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 1998.

SÃO PAULO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Secretaria de Estado de Saneamento e Energia. **S63p Projeto Jurubatuba:** restrição e controle de uso de água subterrânea / Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geológico, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Secretaria de Estado de Saneamento e Energia. São Paulo. DAEE/IG, 2009. 109 p. il. – (Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos; nº 01).

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** 2005.

SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL. **Capacitação Básica em Defesa Civil.** Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Florianópolis, 2012. 126 p.

SILVA, P. M. O. et al. 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.

SILVA, R. A. P. **Sistemas de Suporte à tomada de Decisões em Gerenciamento de Cheias.** 2006. 262 f. Dissertação – USP, Universidade de São Paulo, 2006.

SPERLING, M. V. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte - MG: DESA/UFMG, 2005. V.1

SUDERHSA. Estudos Hidrológicos – Metodologia e Hidrogramas Calculados. **Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba.** Tomo 3.2. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Paraná, Brasil, 2002.

TELLES, W. R.; NETO, A. J. S.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Modeling the Flow of a River Using the MOHID Plataform**, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), 2013a.

_____. Utilização de Sistemas de Informações Geográficas na delimitação de bacias hidrográficas. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego,** Campos dos Goytacazes - RJ, v. 7 n. 1, p. 19-30, jan./jun. 2013b. 4679-12330-1-PB, DOI: 10.5935/2177-4560.20130002.

TOMINAGA, E. N. de S. **Urbanização e Cheias:** medidas de controle na fonte. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, 2013.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** Ciência e Aplicação. 3. ed. Porto Alegre- RS: UFRGS, ABRH, 2004.

_____. **Hidrologia:** Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Ed. da Universidade – ABRH: EDUSP. In: TUCCI, C. E. M. (Org.), 2009.

_____. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de. (Org.). Drenagem Urbana. Drenagem Urbana. 1. ed. **ABRH Associação Brasileira de Recursos Hídricos,** Porto Alegre, Editora da Universidade (UFRGS), v. 1, p. 15-36, 1995.

_____. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editorada UFRGS, 2005. 678p.

3 ARTIGO CIENTÍFICO II

ESTUDO DAS COTAS DE INUNDAÇÃO EM CANAIS URBANOS DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ÁREAS ESTUARINAS, SOB EFEITO DE MARÉS E CHUVAS LOCALIZADAS

RESUMO

Os fenômenos naturais são de grande complexidade e muitas vezes existe a impossibilidade de medir e avaliar todas as suas variáveis e/ou etapas. Isso dificulta os estudos para sua compreensão. Uma abordagem básica destes fenômenos, apenas para compreendê-los fisicamente, de forma sintética, torna necessária a utilização de leis empíricas e de hipóteses, o que requer a aplicação da modelagem. Portanto, para estudar estes fenômenos, precisa-se ter modelos. Este trabalho apresenta os resultados gerados pela aplicação de modelos hidrológico e hidrodinâmico ao Canal do Capote localizado na área urbana de Macaé / RJ e avalia as cotas de inundações decorrentes de picos de chuvas na microbacia e marés de sizígia em seu estuário, As ferramentas utilizadas foram: a equação de Manning – Stickler, a modelagem hidrológica, com geração de hidrogramas para diversos tempos de recorrência e a modelagem hidrodinâmica que inclui um algoritmo na forma implícita de quatro pontos para resolução das equações completas de Saint Venant pelo método das diferenças finitas, com aproximações para ambas as derivações: temporal e espacial, originadas da continuidade e momento. A solução para a taxa de escoamento e elevação da superfície líquida foram então obtidas para tempos e distâncias incrementais ao longo do canal. A partir das informações topobatimétricas disponíveis foi construído um modelo digital de terreno, calibrado, medindo-se as variações limnimétricas do canal e vazões e comparando-se os dados observados e simulados para as condições de picos e baixas. Os modelos simularam diferentes cenários, com ênfase, principalmente, naqueles que foram gerados sob regime de alta vazão, por representarem situação mais crítica do ponto de vista ambiental e interesse deste trabalho. Os resultados mostraram que, para essas condições, áreas importantes próximas a esse canal, serão inundadas.

Palavras-chave: Inundação. Canais. Marés. Chuvas. Estuário.

STUDY OF FLOOD QUOTAS IN CHANNELS URBAN BOWLS SMALL HYDROGRAPHIC IN ESTUARINE AREAS UNDER EFFECT OF TIDES AND RAINFALL LOCATED

ABSTRACT

Natural phenomena are of great complexity and there is often the impossibility of measuring and evaluating all their variables and / or stages. This hampers studies for your understanding. A basic approach to these phenomena, only to understand them physically, in a synthetic way, makes necessary the use of empirical laws and hypotheses, which requires the application of modeling. Therefore, to study these phenomena, one must have models. This work presents the results generated by the application of hydrological and hydrodynamic models to the Canal do Capote located in the urban area of Macaé / RJ and evaluates the flood quotas due to rainfall peaks in the microbasin and the tidal areas of the estuary: The Manning - Stickler equation, the hydrological modeling, with generation of hydrograms for several times of recurrence and the hydrodynamic modeling that includes an algorithm in implicit form of four points for resolution of the complete equations of Saint Venant by the method of the finite differences, with Approximations for both derivations: temporal and spatial, originating from continuity and momentum. The solution to the flow rate and net surface elevation were then obtained for incremental times and distances along the channel. From the available topohymetric information, a calibrated digital terrain model was constructed, measuring the limnimetric variations of the channel and flows and comparing the observed and simulated data for the peak and low conditions. The models simulated different scenarios, with emphasis mainly on those that were generated under high flow regime, because they represent a more critical situation from the environmental point of view and the interest of this work. The results showed that for these conditions, important areas near this channel will be flooded.

Keywords: Flood. Channels. Tides. Rain. Estuary.

3.1 Introdução

Praticamente toda semana toma-se conhecimento de países que enfrentam intensos eventos hidrológicos, atribuídos às mudanças climáticas globais, com grandes prejuízos econômicos e perdas de vida. Inundações são riscos naturais, imprevisíveis até certo ponto,

mas, inevitáveis, UNISDR (2012). Este trabalho apresenta os resultados gerados por modelo hidrológico e hidrodinâmico, aplicado ao Canal do Capote localizado na área urbana de Macaé / RJ, com o objetivo de avaliar as inundações decorrentes de picos de chuvas, cheias do rio Macaé e marés de sizígia em seu estuário, úteis, quase sempre, no licenciamento e construção de novos empreendimentos.

O acelerado processo de urbanização ocorrido nas últimas décadas constitui o principal fator responsável pelo agravamento dos problemas relacionados às inundações nas cidades, aumentando a frequência e os níveis das cheias. Além disso, a inexistência de Planos Diretores de Drenagem Urbana, capazes de equacionar os problemas de drenagem sob o ponto de vista da bacia hidrográfica; e a concepção inadequada da maioria dos projetos de drenagem urbana; contribuem significativamente para o agravamento do problema (SÃO PAULO, 1998).

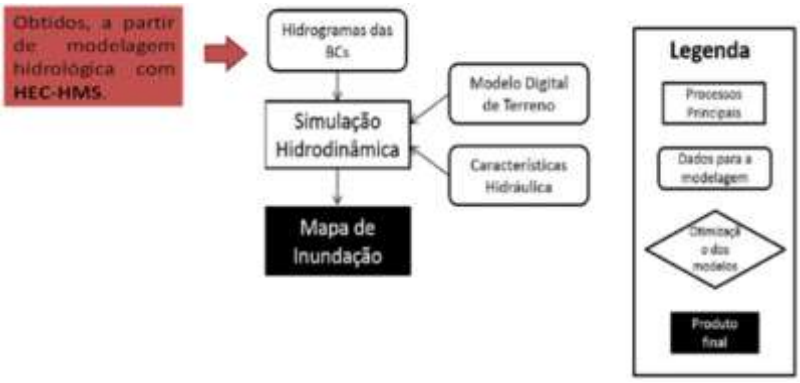
Nesse contexto, projetos de drenagem tornam-se fundamentais no equacionamento do problema. No entanto, as soluções tradicionalmente adotadas para tais problemas, de um modo geral, apresentam caráter localizado. Em muitas obras de canalização e retificação, os trechos de canais reduzem o prejuízo das áreas afetadas, mas por conta da transferência das vazões, as inundações agravam-se à jusante, um indicativo de que drenagem urbana é fundamentalmente uma questão de “alocação de espaços” (CANHOLI, 2014).

A proposta evidenciada no presente trabalho incide diretamente à problemática das cheias e inundações no município de Macaé, apresentando notável interesse social, ambiental e econômico. Embora a bibliografia disponível em outros países e regiões deste país seja pródiga na implantação de conceitos inovadores em drenagem urbana, a aplicação desses novos conceitos, ou mesmo a especulação da sua aplicabilidade é considerada ainda, incipiente. (CANHOLI, 2014; MIGUEZ, 2015).

Utiliza-se a plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*), desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*) que é considerada bastante robusta e permite a simulação de grandes bacias e redes completas de macrodrenagem. Possui diferentes módulos que permitem realizar simulações para variadas finalidades em gerenciamento de recursos hídricos. O módulo HEC-HMS (*Hidrologic Modeling System*) simula o processo de transformação chuva-vazão em sistemas de bacias e sub-bacias hidrográficas. Já o módulo HEC-RAS (*River Analysis System*), possibilita a simulação unidimensional do escoamento em canais abertos, sob o regime permanente e não permanente e também na condição de fundo móvel (transporte de sedimentos) (CANHOLI, 2014; HEC US 2016).

Os estudos objetivaram desenvolver e testar um sistema de simulação de inundações (**Figura 5**) em microbacias urbanas, através do desenvolvimento de um modelo hidrológico (HEC-HMS) e hidrodinâmico (HEC-RAS) que incorporasse na modelagem hidrológica a intensidade de chuvas estimadas, infiltração e escoamento superficial mais a fisiografia da bacia (Modelo Digital do Terreno - MDT), gerando assim, hidrogramas que juntado às características hidráulicas (nível, vazão e coeficientes de Manning) sob-regime de marés, após calibração e simulações, permite a criação de mapas de inundações da área envolvente.

Figura 5 – Fluxograma do estudo para obtenção dos mapas de inundação.



Fonte: Adaptado de GPDEN / IPT / UFRGS, 2015.

O modelo foi calibrado medindo-se as variações limnimétricas do canal e vazões em várias campanhas e localizações, comparando-se os dados observados e simulados para as condições de picos e baixas. Uma vez calibrados, os modelos simularam diferentes cenários, com ênfase principalmente naqueles que foram gerados sob regime de alta vazão, por representarem situação mais crítica do ponto de vista ambiental e interesse deste trabalho. Os resultados mostraram que, para essas condições, áreas importantes próximas a esse canal, serão inundadas.

A implementação dos modelos aqui apresentados obedeceu à sequência usual necessária para tal propósito. Fazendo-se uso das informações topo-batimétricas disponíveis, inicialmente foi construído um Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de interesse na condição natural (LUGON JR; COSTA; RODRIGUES, 2016).

No Brasil, há grande carência de dados hidrológicos de sub-bacias hidrográficas. A instalação e coleta de dados tiveram como seu principal agente o setor de geração de energia elétrica. Desta forma, há poucos postos em bacias com menos de 500 km² (KOBIYAMA, 2011). O canal do Capote na cidade de Macaé, estado do Rio de Janeiro, não foge à regra,

com apenas 9,5 Km^2 de área não possui, até o presente momento, nenhuma estação para seu monitoramento.

De acordo com estudo realizado pelo TCE RJ, Macaé registrou nove ocorrências de inundações bruscas de 1991 a 2010, sendo uma no ano 2006, três no ano 2007, três no ano 2008 e mais duas no ano 2009. Dos 50 municípios analisados no estudo, Macaé foi o mais afetado, com um contingente total de 447,4 mil pessoas envolvidas, o que destaca a severidade das ocorrências de cheias no município (TCE RJ, 2012; BARBOZA, 2014). O evento ocorrido em 25 de outubro de 2007 recebeu destaque no jornal de circulação local do município.

Neste estudo, utilizaram-se as medições de marés de sizígia, pluviometria e nível do Rio Macaé na data de 25 de outubro de 2007 como condições iniciais e de contorno para simulação do modelo criado e sua validação com fotos aéreas e terrestres da época e atuais.

Figura 6 – Temporal em 25/10/2007.

Cotação
Dólar C. 1,8060
Dólar V. 1,8060
Ouro 49,300

O DEBATE
DIÁRIO DE MACAÉ

Editorial
Política externa e energia
Página 4

MACAÉ (RJ), QUINTA-FEIRA 25 DE OUTUBRO DE 2007 · O jornal de maior circulação no município · ANO XXXII – Nº 9359 FUNDADOR/DIRETOR: OSCAR PIRES · R$ 1,00

www.odebateon.com.br

Temporal alaga Macaé

A chuva que caiu sobre a cidade ontem à tarde e também durante boa parte da noite provocou grandes estragos. Diversas ruas e bairros ficaram completamente alagados. Muitos moradores, mais uma vez, perderam seus pertences. Lojistas de diversos pontos do município, tiveram prejuízos incalculáveis. Segundo a Defesa Civil, os bairros mais prejudicados pelo temporal foram Centro, Visconde de Araújo, Novo Visconde, Miramar, Riviera Fluminense, Campo D'Oeste, Sol Y Mar e Nova Holanda. Previsão é de mais chuvas. Página 7

Fonte: Disponível em: <https://cotidianosantanaemfoco.wordpress.com/page/21/> Acesso em: 16 ago. 2016.

A (**Figura 6**) mostra a matéria na capa do jornal, com imagens de alguns pontos de alagamento, além de trazer um breve relato dos estragos ocorridos durante a ocasião:

> A chuva que caiu sobre a cidade ontem à tarde durante boa parte da noite provocou grandes estragos. Diversas ruas e bairros ficaram completamente alagados. Muitos moradores, mais uma vez, perderam seus pertences. Lojistas de diversos pontos no município tiveram prejuízos incalculáveis.

Segundo a Defesa Civil, os bairros mais prejudicados pelo temporal foram: Centro, Visconde de Araújo, Novo Visconde, Miramar, Riviera Fluminense, Campo D'Oeste, Sol Y Mar e Nova Holanda (O DEBATE, 2007).

3.2 Metodologia

Existem vários modelos para estudo das inundações que ocorrem principalmente pelo efeito de propagação de ondas de cheias em canais e rios. Os principais modelos para estudo das inundações são: Hidrodinâmico, Difusão, Onda cinemática, Armazenamento, Muskingum e modificação Muskingum-Cunge (**Figura 7**). Segundo Tucci (2005) os modelos hidrodinâmicos são aqueles que utilizam a forma completa das equações de Saint Venant, utilizado neste trabalho.

Figura 7 – Principais modelos para estudo de inundações.

Efeitos / Modelos	Translação e Amortecimento	Efeito de jusante	Planície de inundação	Parâmetros	Resultados fornecidos
Reservatório linear simples	Sim	Não	Há possibilidade	Empírico/Físico	Vazão
Muskingum	Sim	Não	Não	Empírico	Vazão
Onda cinemática	Sim	Não	Não	Físico	Vazão
Muskingum-Cunge linear	Sim	Não	Não	Físico	Vazão
Muskingum-Cunge não linear com planície de inundação	Sim	Não	Sim	Físico	Vazão
Difusão	Sim	Sim	Há possibilidade	Físico	Vazão, nível
Hidrodinâmico completo	Sim	Sim	Sim	Físico	Vazão, nível d'água, área alagada

Fonte: Adaptado de PAIVA, 2009.

3.2.1 Formulação matemática

Na maioria das vezes os modelos de simulação utilizam métodos numéricos para solução das equações. Segundo Monteiro, Kobiyama e Zambrano (2015), as simulações hidrodinâmicas utilizam métodos numéricos para resolver as equações diferenciais do escoamento (Equação do Movimento e da Continuidade). Em hidrodinâmica, o método das Diferenças Finitas é um dos mais utilizados. Este método reduz um problema de sistemas de equações e fornece uma solução em pontos (nós) discretizados no interior do domínio do problema. Em sua totalidade, os escoamentos são não permanentes já que variam ao longo do tempo. Quando se tem interesse na variação de um fluxo com o tempo, como no caso de propagação de hidrogramas, torna-se necessário o uso de equações que levam em consideração a variação temporal do escoamento.

Como exemplo, na plataforma MOHID, os pontos de fluxo de drenagem na rede utilizam uma abordagem unidimensional (integrada sobre a área da secção transversal) por meio de equações de Saint Venant (1). Por outro lado, o escoamento na bacia é modelado por uma abordagem bidimensional (integrada através da profundidade), sendo regido pela equação de difusão de onda, enquanto que o escoamento superficial faz uso de uma abordagem tridimensional, sendo regido pela equação de Richard (TELLES *et al*, 2013 *apud* BRAUNSCHWEIG; FERNANDEZ, 2010).

A equação de Saint-Venant (1) é uma das formulações clássicas para o cálculo de escoamentos em canais. Mesmo que esta equação possua simplificações, como o da pressão hidrostática e o da difusividade do fluido, ela é aceita e amplamente utilizada.

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{aceleração local}} + \underbrace{\frac{\partial \frac{Q^2}{A}}{\partial x}}_{\text{aceleração advectiva}} + \underbrace{gA\frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{pressão hidrostática}} = \underbrace{gAS_o}_{\text{declividade de fundo}} - \underbrace{gAS_f}_{\text{declividade da linha de energia}} \quad (1)$$

E é utilizada junto à equação da continuidade (2):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0 \quad (2)$$

Em que Q é a vazão normal a seção transversal.

A é a área molhada da seção transversal.

x é a a distância.

g é a aceleração da gravidade.

h é a profundidade do escoamento.

S_o é a declividade.

O canal S_f é a declividade da linha de energia.

q são as vazões laterais entre duas seções.

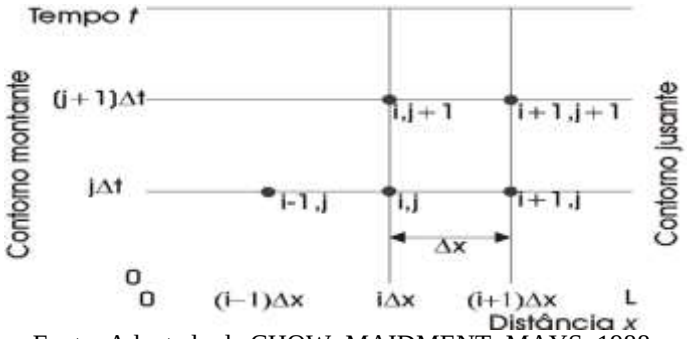
t é o tempo.

Para simulações bi ou tridimensionais se utiliza ainda, ou uma modificação da equação de Saint Venant, ou as equações de Navier-Stokes.

Chow, Maidment e Mays (1988) confirmam que as equações de Saint-Venant para escoamentos distribuídos, não são facilmente resolvidas por soluções analíticas, exceto em pouquíssimos casos. Existem equações diferenciais parciais, em geral, resolvidas utilizando-

se métodos numéricos. Tais métodos são classificados como Métodos Característicos ou Numéricos Diretos. Para os Métodos Diretos as equações das diferenças finitas são formuladas a partir das equações diferenciais parciais originadas da continuidade e momento. A solução para a taxa de escoamento e elevação da superfície líquida são então obtidas para tempos e distâncias incrementais ao longo do canal. Em métodos numéricos para resolução das equações parciais os cálculos são executados em uma malha localizada sobre o plano x-t. O plano x-t é uma rede de pontos definidos por incrementos de distância de comprimento Δx e incrementos de tempo de duração Δt, os pontos de distância são denotados pelo índice i e os pontos de tempo pelo índice j.

Figura 8 – Malha do plano x-t usada para solução numérica das equações de Saint-Venant por diferenças finitas.

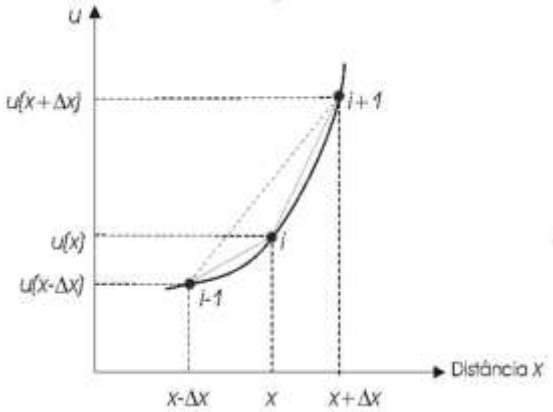


Fonte: Adaptado de CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988.

A linha do tempo (**Figura** 8**8**) seria uma linha paralela ao eixo x por todas as distâncias e para um valor de tempo definido. Esquemas numéricos transformam as equações diferenciais governantes em um esquema de equações de diferenças finitas algébricas, que pode ser linear ou não linear.

As equações de diferenças finitas representam as derivadas espaciais e temporais em termos de variáveis desconhecidas em ambas as linhas do tempo, j+1 e sua linha precedente j, onde todos os valores são conhecidos do cálculo anterior. As soluções das equações de Saint-Venant avançam de uma linha do tempo para a próxima. O método das diferenças finitas pode utilizar o esquema implícito ou o esquema explícito. A principal diferença entre os dois é que para o esquema explícito os valores desconhecidos são obtidos de forma sequencial ao longo do eixo do tempo de um ponto de distância para outro, enquanto que no esquema implícito os valores desconhecidos em uma linha do tempo são obtidos simultaneamente. O esquema explícito é bem mais simples (**gráfico 2)**, mas pode ser instável, o que significa que valores de Δx e Δt pequenos são necessários para a convergência numérica da simulação.

Gráfico 2 – Aproximações por diferenças finitas para a função u(x).



Fonte: Adaptado de CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988.

O esquema implícito é matematicamente mais sofisticado, mas com a aplicação de computadores isto não se traduz num problema sério. O esquema implícito é estável para longos intervalos com baixa perda de precisão e assim trabalha mais rápido que o esquema explícito. Este método também pode suportar variações significativas entre as seções que descrevem o canal.

A aproximação para o esquema de diferenças finitas pode ser aproximada pela função u(x). Por um processo de expansão da série de Taylor de u(x) em um ponto x + Δx que possui um erro de aproximação de ordem de Δx. Este erro de aproximação, devido à eliminação dos termos de ordem maior, é também referido como erro truncado.

O *software* utilizado neste trabalho (HEC-RAS) inclui em seus algoritmos a forma implícita de quatro pontos para resolução do método das diferenças finitas, conhecido como "esquema caixa". Os esquemas implícitos usam as aproximações por diferenças finitas para ambas as derivações temporal e espacial em termos da variável dependente em uma linha do tempo qualquer (USACE, 2016a).

3.2.2 Área de Estudo

Amaral (2003, p. 06) define bacia de drenagem como: "Uma área topográfica, drenada por um curso da água ou um sistema conectado de cursos da água de forma que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída".

A bacia de drenagem do Canal do Capote (22º 22' 46.73" S, 41º 48' 05.55" W) com extensão de 5,63 Km **(Figura 9)** e área aproximada de 9,5 km^2, nasce no bairro da Glória e deságua no rio Macaé na altura dos bairros pobres Botafogo e Malvinas.

A Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) localiza-se na faixa costeira central-norte do Estado do Rio de Janeiro, entre a Região Hidrográfica Baixo Paraíba do Sul e a Região Hidrográfica Lagos São João. É constituída pelas bacias hidrográficas dos rios Macaé, das Ostras, da Lagoa de Imboacica e de pequenos córregos e lagoas litorâneas. Abrange totalmente o território do município de Rio das Ostras e parcialmente os municípios de Macaé, Nova Friburgo, Casimiro de Abreu, Conceição de Macabu e Carapebus, totalizando uma área de 1978 km² (PLANO MACAÉ/OSTRAS, 2016).

Figura 9 – Localização do Canal do Capote.

Fonte: Autor, 2015.

Historicamente suas inundações são fortemente influenciadas pelas cheias do rio Macaé.

Segundo Tavares (2011), 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 foram incorporadas ao patrimônio da PETROBRAS. Neste trabalho o autor, através da modelagem computacional, cria diversos cenários e simulações utilizando variáveis de batimetria e fluviometria que podem alterar a disponibilidade hídrica do rio Macaé, impactando diretamente o canal do Capote.

3.2.3 Levantamento de dados - Hidrometria do canal do Capote

A hidrometria é uma parte da hidrologia. Pode-se dizer que o monitoramento hidrológico é a hidrometria feita de maneira contínua. Como a hidrometria é responsável pela coleta e fornecimento de dados, ela pode ser considerada a base experimental da hidrologia, que é uma ciência natural e empírica. Enquanto os modelos são uma representação da realidade, podemos considerar os dados medidos como o mundo real (KOBIYAMA, 2011).

Entraves à gestão de recursos hídricos podem ocorrer em virtude da carência ou mesmo inexistência de dados de monitoramento dos corpos hídricos em questão. De acordo com Christofoletti (1999), tal dificuldade pode ser superada através da utilização de modelos de síntese e simulação, capazes de gerar sequências artificiais. No caso do controle de cheias, por exemplo, a inexistência de medidas reais de vazão máxima de rios pode ser suplantada com modelagens de inundação da planície adjacente (PLANO DE BACIA MACAÉ / OSTRAS, 2016).

Para escolha dos métodos apropriados para a medição do canal do Capote, avaliaram-se os custos e detalhamento adequados para cada levantamento de campo, cuidando-se da qualidade da medição e verificação dos dados.

Devido a dependência de dados de chuva, nível e vazão, foram nessas variáveis que houve uma maior padronização e consolidação dos métodos de medição. Porém, sabe-se que a água da chuva não cai diretamente no canal, e a circulação da mesma na sub-bacia hidrográfica dá-se em diferentes processos e escalas (interceptação e escoamento subterrâneo, por exemplo). Então, havendo condições, deve-se envolver não só a área de hidráulica do canal, mas também topografia, física do solo etc. e até mesmo agronomia, gerando-se dados consistentes, onde a variabilidade espaço-temporal dos processos é grande e tem-se um número limitado de aparelhos de medição (KOBIYAMA, 2011).

3.2.3.1 Dados de vazão do canal

A medição de vazão é parte básica da maioria dos estudos hidrológicos. Uma das ferramentas é o levantamento da curva-chave, porém, o uso da curva-chave nas simulações de cheias é muito discutível sabendo-se que a incerteza na curva-chave aumenta abruptamente na parte extrapolada. A necessidade de extrapolação é a regra, e não a exceção entre as estações fluviométricas, principalmente a extrapolação superior da curva. Isto se dá devido a dificuldade de se ter um número suficiente de equipes a postos para efetuar medições de

vazão nos momentos de cheias, ou quando isso acontece, pode haver impossibilidade de se efetuar a medição devido aos riscos, em função das altas velocidades das águas do rio (TUCCI; SILVEIRA, 1985).

O levantamento de dados de vazão em campo ocorreu em três campanhas, a primeira focou o trecho mais baixo do canal, a segunda (**Foto 1**), o seu curso médio, e a última o seu trecho mais elevado (alto da Glória).

Foto 1 – Levantamento em campo dos dados de vazão.

Fonte: Equipe de Pesquisa da UERJ, 2016.

Na data da segunda medição, a baixa-mar ocorreu às 08h19, com um nível de 0 m e a preamar às 14h34 com 1.3 m. Observou-se (**Tabela 2**) que apenas a primeira medição do dia, por volta das 10h30, teve o sentido de fluxo do canal do Capote para o rio Macaé. As restantes são todas do rio Macaé para o canal do Capote. No período de 10h16 às 10h45 verifica-se que a velocidade ficou muito baixa pois ocorreu inversão do sentido de fluxo.

Tabela 2 – Resultados de Vazão - *Flow Tracker*.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Horário Incial	10:16 – 10:45	11:20 – 12:00	12:40 – 13:43	14:11–14:40	15:26-16:00	16:30-16:50
Profundidade (m)	0,9855	0,9485	0,9855	1,000	0,9855	0,9930
Vazão (m^3/s)	–0,3717	0,1557	0,5248	0,8888	0,9001	0,8161
Incerteza (vazão)	4,3 %	4,8 %	5,0 %	1,7 %	1,5 %	1,8 %

Fonte: Equipe de Pesquisa da UERJ, 2016.

O cálculo das vazões foi feito a partir da velocidade do fluxo no sentido do movimento com desvio máximo de 20º no sensor e da área da seção transversal ao fluxo. As medições foram feitas em período pouco chuvoso (agosto e setembro).

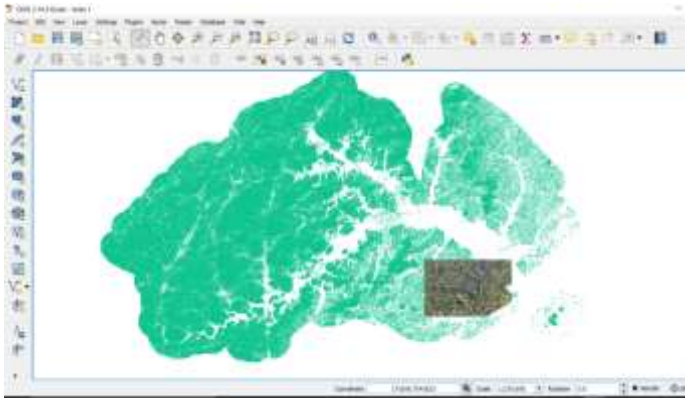
3.2.3.2 Dados topobatimétricos

O dado topográfico mais importante para este trabalho é o Modelo Digital de Elevação (MDE), já que é a representação do relevo. O MDE foi obtido a partir das Cartas de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações do Município de Macaé - RJ. Esta base foi elaborada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, através do programa de Gestão de Riscos a Respostas a Desastres Naturais, incluído no plano plurianual 2012 - 2015 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Atualmente abrange 286 municípios brasileiros.

O download da base cartográfica pode ser feito a partir do *site* do CPRM: http://www.cprm.gov.br/. Entretanto, existem diferentes formas de se obter um MDE, que está disponível gratuitamente em quase todo o mundo através do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

No presente estudo, em função do grande tamanho e resolução do arquivo baixado, fez-se um recorte da área de interesse a fim de facilitar seu processamento, utilizando-se a ferramenta QGIS (*Quantum GIS*) com o recurso OTF (*On The Fly*) ligado e utilizando o sistema de referência de coordenadas EPSG 31984. A área retangular (**Figura 10**) está compreendida entre os vértices opostos em UTM (204444, 7519253) e (215282, 7526880) no sistema de referência de coordenadas SIRGAS 2000, UTM zona 24S. A utilização de coordenadas geográficas em UTM deve-se ao fato do HEC-RAS só trabalhar com estas unidades para georreferenciamento das seções transversais ao rio ou canal. A partir do recorte com resolução de 10 metros entre curvas de nível (), gerou-se o MDE da área de estudo, incluindo-se um *raster* recortado nas mesmas coordenadas (EPSG 31984) de uma ortofoto ECW (*Enhanced Compression Wavelet*), também disponibilizada no *site* do CPRM.

Figura 10 – Geoposicionamento da área de trabalho.



Fonte: Autor, 2016.

Em seguida, com a utilização da função *Fill Sinks* da ferramenta ArcHydro, fez-se o preenchimento de falhas e depressões. Esta é uma ferramenta que permite preencher imperfeições nos dados e remover todos os *Sinks* do raster de superfície. Estas depressões são resultantes de erros nos processos de geração do MDE. O processamento modifica os valores de elevação para reduzir estes problemas.

Apesar do cálculo de direção de fluxo, para cada célula do raster, ser de grande importância na derivação de características hidrológicas de uma superfície, não se utilizou este cálculo em função de considerar-se apenas o canal principal. O mesmo para área acumulada e rede de drenagem.

Definição do exutório:

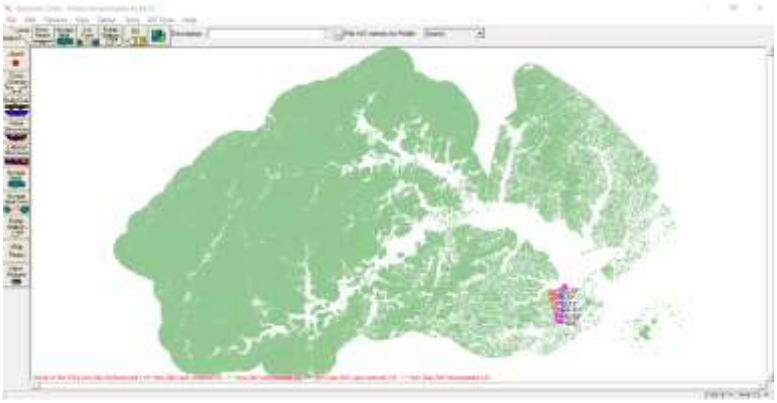
O exutório é o ponto de saída da bacia de interesse mais a jusante. Para sua definição o ArcHydro utiliza a função *Batch Point Generation* que permite inserir o ponto na rede de drenagem. É importante que o ponto esteja posicionado sobre o pixel da rede de drenagem raster para seu processamento. Neste estudo, foi considerado como exutório a seção transversal ao canal, imediatamente anterior à ponte de entrada do bairro das Malvinas, junto a uma comporta abandonada, coordenadas UTM Zona 24 K (212683.00, 7523964.00).

Delimitação da bacia:

Segundo Kobiyama (2011), a Bacia hidrográfica é uma área limitada por um divisor de águas gerado a partir da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, o exutório, e as separa das bacias adjacentes. No ArcHydro a delimitação de uma bacia é realizada automaticamente utilizando a função *Batch Subwatershed Delineation*, considerando o mapa de direções de fluxo, rede de drenagem raster e o ponto do exutório. Foi calculada a área de 9,5 Km^2.

Após a delimitação da bacia, realizou-se a definição das áreas de interesse (**Figura 11**). Neste caso, o objetivo foi obter informações relevantes para a realização das simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, a fim de conseguir criar o mapa de inundações. Definiu-se a área inundável, a partir de eventos passados de inundação, levantamento em campo, fotografias, dados observados de vazão e obtendo-se informações em entrevista com moradores. Considerou-se que todo o Canal do Capote é área inundável (AI) para as simulações hidrodinâmicas.

Figura 11 – Área de interesse dentro da BH do Rio Macaé.



Fonte: Autor, 2016.

Batimetria:

O canal do Capote apresenta um perfil transversal trapezoidal, com uma largura média na base entre 10 e 12 m, taludes de declividade variável e margens irregulares. A profundidade também é irregular, variando sensivelmente entre 0,9 e 2,2 m. Em perfil longitudinal, verifica-se que não existe uma uniformidade na inclinação do canal, registrando-se sucessivos trechos ascendentes e descendentes, que denunciam um elevado assoreamento e deposição de lixo no fundo do canal, resultante do lançamento de esgoto *in natura* atrás referido. Como a modelagem hidrodinâmica requer a adoção de uma inclinação, foi utilizada a inclinação média do canal, já medida em estudo anterior, com base nas cotas (z) de soleira dos perfis transversais inicial e final de todo o trecho. Obteve-se entre os perfis, uma inclinação média de 0,03%. Como exemplo, calculou-se as a declividade em dois eixos do canal, limitados pelas respectivas estações.

Eixo 2:

Estação 28: z soleira = - 0,11

Estação 154+18,94 z soleira = - 0,89

Distância entre estações = 2.538,94 m

Inclinação média= 0,03 %

Eixo 1:

Estação 155: z soleira = - 0,11

(o valor indica assoreamento; adotou-se a cota de jusante do Eixo 2 = - 0,89)

Estação 206+11,82 z soleira = - 1.19

Distância entre estações = 1.031,82 m

Inclinação média = 0,03 %

A passagem do Eixo 2 para o Eixo 1 corresponde à localização de uma ponte na entrada do bairro Aroeiras sobre o canal do Capote. Neste local, o escoamento é assegurado por duas manilhas de concreto, DN 1500.

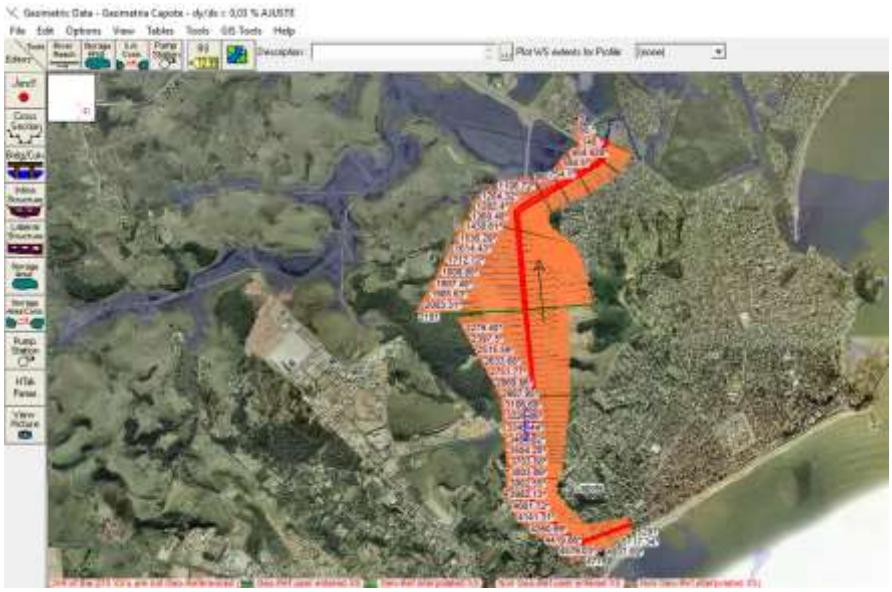
Com base nos dados das estações levantadas (declividade e medidas das seções), foram obtidas dez seções transversais trapezoidais (**Figura 12**) e lançadas no HEC-RAS junto com a topografia obtida a partir do MDE da CPRM.

Figura 12 – Seções transversais de referência.

Fonte: Autor, 2015.

As seções foram interpoladas (**Figura 13**) visando-se um aumento na estabilidade das simulações.

Figura 13 – Modelo com as seções transversais interpoladas.



Fonte: Autor, 2015.

A maneira mais produtiva de se trabalhar nesta área é aquela em que as pessoas que trabalham com levantamento topobatimétricos e com modelagem tenham um diálogo e usem suas habilidades como complemento do conhecimento comum. Os profissionais responsáveis pelas medições em campo, podem reconhecer e informar as mudanças e problemas ocorridos durante as medições, e.g., mudanças no local da estação, horários de medição, mudanças de equipamentos e equipe. Esse tipo de informação é essencial para a pessoa que vai modelar os dados (KOBIYAMA, 2011).

3.2.3.3 Dados de chuva

É difícil obter-se banco de dados de chuva para sub-bacias hidrográficas, além disso, como se mede a chuva de maneira representativa em uma determinada bacia, já que existe uma variabilidade tridimensional do fenômeno? Uma solução é utilizar-se equações de chuva para a localidade mais próxima da área estudada, equações de Intensidade – Duração – Frequência (IDF), junto com modelos hidrológicos sintéticos. Solução que foi adotada neste trabalho.

Segundo o CBH Macaé Ostras: “O período mais chuvoso na bacia hidrográfica do rio Macaé, corresponde ao trimestre dezembro, janeiro e fevereiro. Os eventos de chuvas mais intensas ocorrem nesse período, com picos de até 100 mm em um intervalo de 24 horas, com períodos de recorrência de 8 a 10 anos”.

Para expressar as relações de Intensidade-Duração-Frequência – IDF das chuvas, fez-se um ajuste de distribuição de frequência com base na equação de chuva **(3)** intensa (PFAFSTETTER, 1982) para o município de Macaé / RJ, visando obter a intensidade máxima das chuvas para cada TR:

$$i_{\max} = \frac{444{,}258 * T_R^{\,0{,}263}}{(t + 6{,}266)^{0{,}655}} \qquad (3)$$

Sendo:

$i_{\max}$ = Intensidade máxima em mm/h;

T_R = Tempo de recorrência em anos;

t = Duração da chuva em horas;

Substituindo-se os valores informados pelo CBH Macaé Ostras (t = 24 horas e T_R = 10 anos), obteve-se um i_{max} = 87,22 mm/h, valor plenamente compatível com o informado pelo comitê (PLANO DE BACIA MACAÉ / OSTRAS, 2016).

Validada a equação de chuva para Macaé com base nos dados da CBH Macaé Ostras, determinou-se a intensidade máxima para todos os TR deste estudo. Os resultados são apresentados na **Tabela 3**:

Tabela 3 – Intensidade máxima de chuvas para o município de Macaé.

TR (anos)	i_{max} (mm/h)
5	72,68
10	87,22
20	104,66
50	133,18
100	159,81

Fonte: Autor, 2016.

3.2.3.4 Dados de Marés de Sizígia

Os dados (hidrógrafa) da maré de sizígia (**Tabela 4**) ocorrida em 25/10/2007 foram obtidos do marégrafo instalado no Porto de Imbetiba, no bairro de Ponta da Imbetiba, Macaé / RJ, suas coordenadas aproximadas em SIRGAS 2000 são: 22º23’08” S; 41º46’10” O, de propriedade do IBGE, emprega redundância de medição operando dois medidores de maré com princípios distintos de funcionamento, para evitar a falta de informação devido à falha do instrumento. Além disso, ao atualizar o método de armazenamento de dados, foi possível disponibilizar as informações em tempo real. Como resultado, a estação de Macaé tornou-se uma estação piloto para a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG. A rede entrou efetivamente em operação a partir de 2001, após a instalação de equipamentos digitais (LEMOS; GHISOLFI, 2010).

Os valores disponibilizados para o nível d’água são relativos, ou seja, utilizam um referencial próprio do IBGE. Apenas as variações do nível devem ser consideradas como informações absolutas. (IBGE / RMPG, 2016).

Tabela 4 – Altura das marés no Porto de Imbetiba em 25/10/2007.

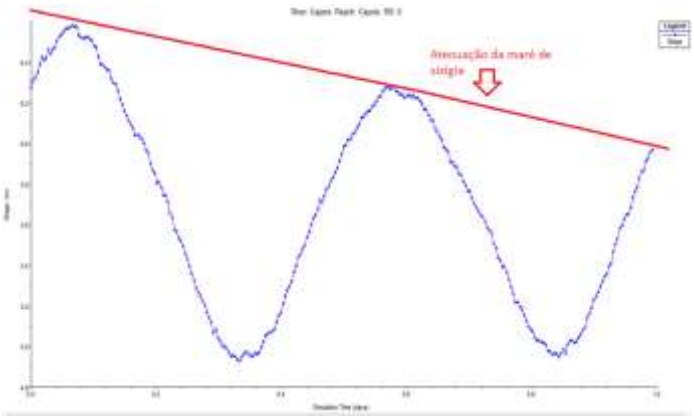
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	ALTURA MARÉS NO PORTO DE IMBETIBA, MACAÉ / RJ											
2	MÁXIMA =	2.183		MÍNIMA =	0,529							
3	YYYY		mm		dd	hour	min	sec	nível (m)	nível (mm)	NÍVEL ATENUADO (m)	maré + cheia do rio Macaé
4	2007		10		25	0	0	0	1.874	1874	1.584	3.274
5	2007		10		25	0	5	0	1.91	1910	1.62	3.31
6	2007		10		25	0	10	0	1.926	1926	1.636	3.326
7	2007		10		25	0	15	0	1.949	1949	1.659	3.349
8	2007		10		25	0	20	0	1.988	1988	1.698	3.388
9	2007		10		25	0	25	0	2.026	2026	1.736	3.426
10	2007		10		25	0	30	0	2.011	2011	1.721	3.411
11	2007		10		25	0	35	0	2.02	2020	1.73	3.42
12	2007		10		25	0	40	0	2.064	2064	1.774	3.464
13	2007		10		25	0	45	0	2.042	2042	1.752	3.442
14	2007		10		25	0	50	0	2.064	2064	1.774	3.464
15	2007		10		25	0	55	0	2.073	2073	1.783	3.473
16	2007		10		25	1	0	0	2.104	2104	1.814	3.504
17	2007		10		25	1	5	0	2.126	2126	1.836	3.526
18	2007		10		25	1	10	0	2.138	2138	1.848	3.538
19	2007		10		25	1	15	0	2.151	2151	1.861	3.551
20	2007		10		25	1	20	0	2.166	2166	1.876	3.566
21	2007		10		25	1	25	0	2.164	2164	1.874	3.564
22	2007		10		25	1	30	0	2.172	2172	1.882	3.572
23	2007		10		25	1	35	0	2.183	2183	1.893	3.583
24	2007		10		25	1	40	0	2.177	2177	1.887	3.577
25	2007		10		25	1	45	0	2.177	2177	1.887	3.577

Fonte: Adaptado de IBGE / RMPG, 2016.

Observa-se que neste dia as marés variaram em até ~1,65 m, o levantamento de dados da altura de maré na entrada do canal do Capote permitiu calcular a altura no mesmo instante em ~1,23 m, mostrando uma atenuação média da onda de cheia da maré entre o Porto de Imbetiba e a entrada do Canal em ~0,42 m. Estes dados da maré atenuada foram utilizados na calibração do modelo como condição de contorno a jusante para a simulação hidrodinâmica.

No **Gráfico 3**, observa-se que a maré de sizígia atingiu o seu pico, na madrugada do dia 25/10/2007. A declividade da linha que tangencia os picos evidencia este fato.

Gráfico 3 – Hidrógrafa do Porto de Imbetiba em Macaé / RJ em 27/10/2007.



Fonte: Autor, 2016.

3.2.3.5 Dados de nível do canal - Réguas limnimétricas

Instalaram-se réguas limnimétricas (alumínio anodizado branco, tinta lavável com ~2,5 m) em pontos estratégicos do canal (**Foto 2**), mobilizando-se moradores que se comprometeram, de forma voluntária, a enviar fotos, via *WhatsApp*, principalmente no período de marés de sizígia, sendo que já foram recebidas, até 19/11/2016, dezenas de fotos.

Foto 2 – Régua limnimétrica instalada no Canal do Capote. Coordenadas (22o 22.155´S, 41o 47.950´W).

Fonte: Morador da localidade (Vicente), enviada às 08h16 de 19/09/2016.

A leitura dos pontos de medições (**Tabela 5**), num ponto intermediário do canal, mostrou o amortecimento da onda de vazão adentrando o canal, tendência esta já observada rodando-se o modelo na fase de testes com as variações de altura das marés do Porto de Imbetiba como referência direta para entrada do Canal do Capote.

Tabela 5 – Variações de marés propagadas entre o Porto de Imbetiba e entrada do Canal do Capote.

Foto	Arquivo	Responsável	Posição da régua (EPSG: 31984)	Data	Hora	Nível Canal (m)	Nível Imbetiba (m)	Variação (+/-) (m)
	IMG-20160919-WA0017	Vicente	211790.15 7523653.51	19/09/2016	08:16	1.04	0.5	0.54
	IMG-20160919-WA0044	Vicente	211790.15 7523653.51	19/09/2016	12:16	0.88	-0.3	1.13

Fonte: Moradores dos bairros de Aroeiras, Botafogo e Malvinas, 2016.

Para estudo do efeito das marés de sizígia, foram feitas medições pela manhã e tarde com réguas limnimétricas instaladas em vários pontos entre a entrada do canal (comporta) e o último ponto medido, anotando-se as variações de profundidade no Canal do Capote entre a baixa-mar e preamar, escolheu-se a data de 17/09/2016 (sábado) anterior ao dia de pico das "marés grandes.

Este levantamento de dados das variações da altura do canal do Capote permitiu uma nova calibração do modelo hidrodinâmico, confirmando a atenuação na altura da onda propagada no canal do Capote nas marés de sizígia.

Figura 14 – Pontos de medição e variações de profundidade.

Fonte: Autor, em 16 set. 2016.

Observa-se na **Figura 14** que: h20 representa uma variação de 20 cm na profundidade daquele ponto num ciclo completo da maré.

3.3 Desenvolvimento

De posse das informações levantadas, partiu-se para os cálculos necessários.

3.3.1 Cálculo das elevações críticas do nível do canal – Equação de *Manning- Strickle*r

Os escoamentos em superfície livre podem ser caracterizados pela equação de *Manning-Strickler* (**4**), que propõe o cálculo do caudal, relacionando as características do material do canal, à sua geometria e à inclinação do canal (REBELO, 2015).

$$\mathbf{V = Ks \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{0,5}} \qquad (4)$$

Sendo:

V = velocidade média (m/s);

R = raio hidráulico (m)= A / P;

A = área molhada (m^2);

P = perímetro molhado (m);

Q = A x V = equação da continuidade;

Q = vazão de pico (m3 / s);

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

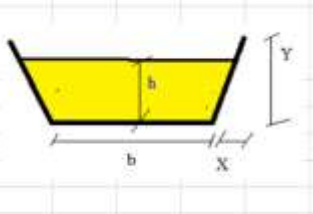
Ks = 1 / n e

S = declividade (m/m).

Partindo-se da hipótese que todo o volume de chuva escoa pela exutória (coeficiente de *runoff* = 1), considerando-se que a área da bacia de contribuição do Canal do Capote é de 9,5 km^2, que o canal é trapezoidal, uniforme em toda sua extensão, com base (b) = 12m, possuindo uma declividade longitudinal do canal S = 0,0003, n = 0,03 (coeficiente de *Manning* para fundo de terra com taludes bastante rugosos) e inclinação lateral da parede de 3 na vertical (Y) e 1 na horizontal (X), calculou-se as alturas críticas (h) pela equação de *Manning - Strickler* (**Tabela 6**), em função das chuvas localizadas para cada TR do estudo.

Tabela 6 – Elevações críticas (m) do canal do Capote com base na equação de *Manning - Stickler*.

TR (anos)	i_{max} (mm/h)	Vazão de pico na exutória do canal (m3/s)	Elevação Crítica (h) do Canal, Manning - Strickler (m)
5	72.68	7.991435185	1.13
10	87.22	9.590162037	1.27
20	104.66	11.50775463	1.43
50	133.18	14.64363426	1.66
100	159.81	17.57170139	1.86



Fonte: Autor, 2016.

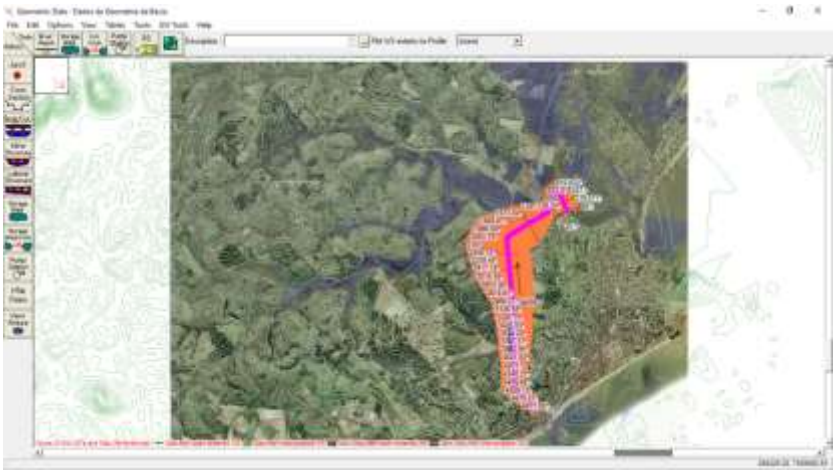
3.3.2 Criação do Modelo Digital do Terreno

Nos modelos de simulação hidrológica, a escolha do intervalo de discretização é em função da economia desejada e da precisão dos resultados que são conflitantes. À medida que o intervalo de discretização diminui, o custo computacional aumenta em favor da melhoria da precisão dos resultados (TUCCI, 2005).

A partir do levantamento topobatimétrico foi criado um Modelo Digital de Elevação (MDE) que forneceu as alturas para definição das seções transversais (**Figura 15**). Este

trabalho também pode ser realizado com o AutoCad Civil 3D, principalmente quando se tem grandes áreas e deseja-se um MDT com maior resolução (inclusive renderização) e detalhes construtivos.

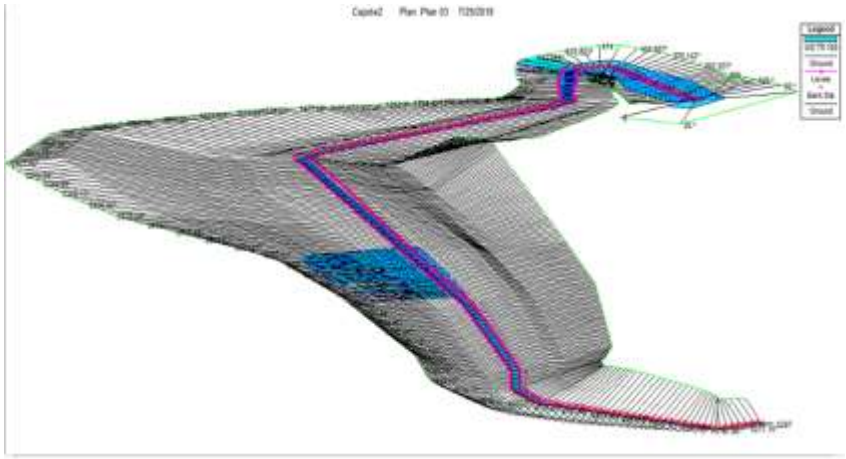
Figura 15 – Área de estudo com as seções transversais.



Fonte: Autor, 2016.

Após levantamento batimétrico, foram incluídos os dados, utilizando o mesmo sistema de referência de coordenadas (EPSG 31984) do levantamento topobatimétrico. Fez-se uma equalização das medições, visando definir um único datum que permitisse analisar com segurança os efeitos das marés sobre o canal, inseriu-se os coeficientes de Manning para as planícies de inundação e para o canal e a distância até a próxima seção transversal, gerando-se seções interpoladas pelo método linear, no MDT que pode ser visualizado em 3D. Com a ferramenta *Compute Interpolation Surface* estendeu-se as seções transversais, a partir daí criou-se o Modelo Digital de Terreno (**Figura 16**).

Figura 16 – Modelo Digital de Terreno (MDT) do canal do Capote.



Fonte: Autor, 2016.

3.3.3 Cálculo do Modelo Hidrológico - Hidrogramas

O ciclo hidrológico compreende os processos de formação, transferência e acúmulo de água. Incluindo a própria precipitação, que é formada a partir do resfriamento do ar e da condensação do vapor na forma de gotas, que aumentam de tamanho por coalescência e aderência até se precipitarem na forma de chuva. O termo precipitação abrange toda a água que cai sobre a superfície da Terra, seja na forma de chuva, neve, granizo ou orvalho. A chuva que atinge o solo pode escoar na superfície, gerando o chamado escoamento superficial, formando rios, córregos e lagos até atingir o mar ou, então, infiltrar no solo, abastecendo os lençóis e os corpos d'água superficiais durante os períodos secos (BARBOZA, 2014).

Os fenômenos que levam de volta a água da superfície para a atmosfera são a evaporação e a transpiração, muitas vezes condensados num único termo: evapotranspiração. A evaporação ocorre quando, dadas certas condições de temperatura e umidade do ar, as moléculas de água na superfície em fase líquida se desprendem e evaporam em fase gasosa. Já a transpiração ocorre por diferença de pressão e temperatura na superfície das folhas das plantas - ocasionando a abertura dos estômatos e a saída de água - e nos animais - com o intuito de equilibrar a temperatura corporal (SANTOS, 2010).

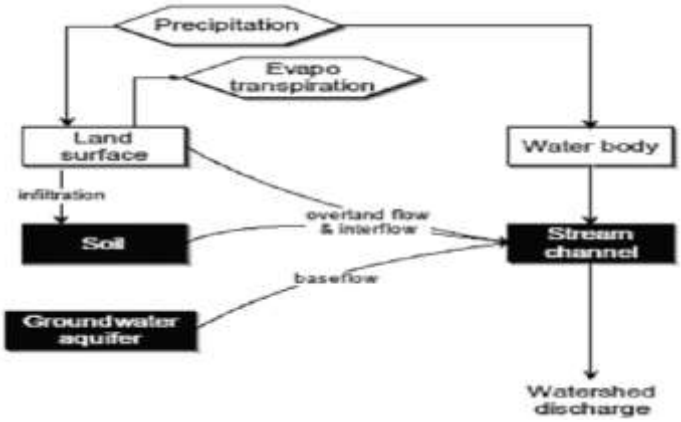
Sabe-se hoje que certas condições meteorológicas e hidrológicas propiciam a ocorrência de inundação. O conhecimento do comportamento meteorológico de longo prazo é muito pequeno devido ao grande número de fatores envolvidos nos fenômenos meteorológicos e à interdependência dos processos físicos a que a atmosfera terrestre está sujeita. Ainda, as condições hidrológicas que produzem a inundação podem ser naturais e artificias (CORDERO; MEDEIROS; TERAN, 1999). A ocorrência de enchentes em períodos de chuvas intensas é um fenômeno natural e cíclico em uma bacia hidrográfica (SANTOS, 2010). Ainda assim, tais ocorrências acarretam em danos às cidades graças à ausência de planejamento urbano e ordenação da ocupação, o que acaba por permitir a ocupação de margens e áreas de inundação.

O modelo hidrológico HEC-HMS de precipitação-vazão utilizado neste trabalho (**Figura 17**), representa parte do ciclo hidrológico e pode considerar: distribuição espacial e temporal da precipitação, perdas por interceptação, evapotranspiração, depressão do solo, fluxo através do solo (infiltração), escoamento superficial e sub-superficial em rios e canais.

Existem diversos métodos para geração de hidrogramas. O método do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS) faz uma simplificação geométrica do processo

físico, pois parte do princípio de que o volume precipitado é igual à área de um triângulo. Não considera os fenômenos de translação e amortecimento do escoamento superficial na bacia.

Figura 17 – Modelo hidrológico HEC-HMS.



Fonte: Adaptado do Manual de referência HEC-HMS (USACE, 2016b).

No presente trabalho, pela indisponibilidade de dados de solos, precipitações localizadas, evapotranspiração etc., optou-se pelo modelo simplificado SCS (**Figura 18**).

Figura 18 – Fluxograma da modelagem SCS (em vermelho) adotada.

Fonte: Adaptado de MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015.

Obtenção dos Hidrogramas para as diversas TR´s:

Para que as estruturas hidráulicas possam ser dimensionadas e construídas é necessário o conhecimento do hidrograma de projeto. Em hidrologia, as vazões e os respectivos hidrogramas de projeto são determinados a partir da análise direta dos dados observados de vazões ou da análise indireta de determinadas características físicas da bacia hidrográfica e de dados observados de chuvas, que são menos escassos do que os dados de vazões e sofrem menor influência em decorrência de alterações antrópicas da bacia hidrográfica. Se, ainda os

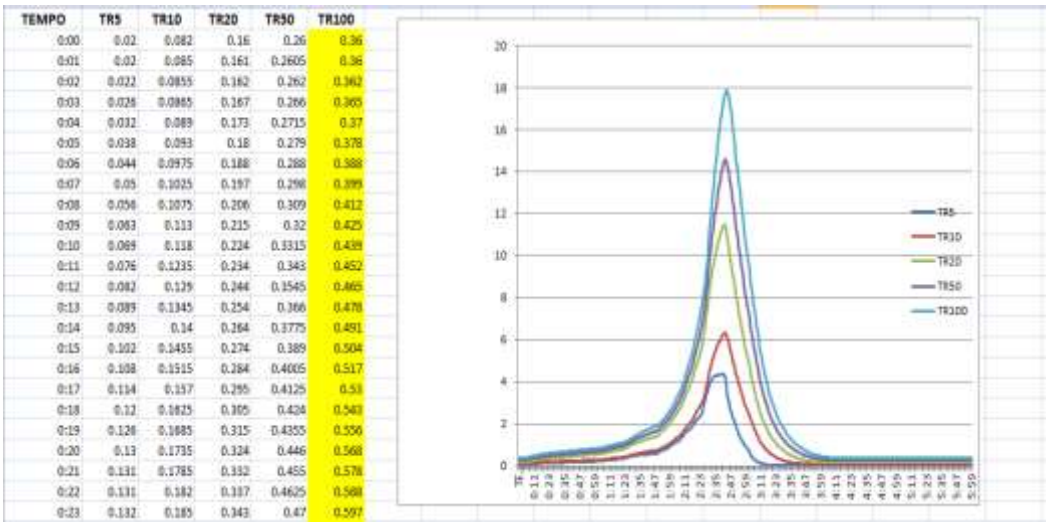
dados de chuva forem insuficientes, são usadas as equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da região mais próxima a do estudo (SILVEIRA, 2010), como realizado neste estudo.

O período de retomo é adotado em função da importância da obra e representa o risco de a estrutura vir a falhar pelo menos uma vez, em sua vida útil (TUCCI, 2005). A ASCE (1992) recomenda que a escolha do período de retorno deva ser precedida de um estudo de risco, associado aos danos provocados por um evento hidrológico superior ao de projeto, durante a vida útil da estrutura hidráulica.

Além do método SCS, são muito usados os métodos de Santa Bárbara e Clark, que diferem do SCS na maneira como consideram o efeito de translação e amortecimento do escoamento superficial na bacia. O método de Santa Bárbara considera a bacia hidrográfica com apenas uma isócrona, cujo intervalo de tempo é igual ou menor ao tempo de concentração. No método de Clark, a bacia hidrográfica é dividida em mais de uma isócrona, possibilitando ao escoamento uma defasagem no tempo. No método de Santa Bárbara a constante linear que representa o amortecimento, varia em função do tempo de concentração. No método de Clark a constante linear é dada em relação ao comprimento do talvegue e área de drenagem da bacia hidrográfica (SILVEIRA, 2010).

No presente trabalho, partiu-se do valor do coeficiente de *runoff* de C=0,65, com base na tabela de valores de *runoff* adotados pela Prefeitura do Município de São Paulo / SP, para zonas com edificação não muito densas, parte adjacente ao centro da cidade, de menos densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas. Utilizaram-se os valores de picos de chuva anteriormente calculados, e algumas características físicas da bacia (declividade média, tempo de concentração etc.), utilizados como dados de entrada do modelo HEC-HMS, gerou-se os hidrogramas estimados para as TR´s de 5, 10, 20, 50 e 100 anos para uma precipitação com duração crítica de 6 horas (**Figura 19**). Esses dados foram inseridos no modelo como condição de contorno à montante do canal.

Figura 19 – Hidrogramas do Canal do Capote para diferentes TR´s e duração crítica de 6 horas.



TEMPO	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
0:00	0.02	0.082	0.16	0.26	0.36
0:01	0.02	0.085	0.161	0.2605	0.36
0:02	0.022	0.0855	0.162	0.262	0.362
0:03	0.026	0.0885	0.167	0.266	0.365
0:04	0.032	0.089	0.173	0.2715	0.37
0:05	0.038	0.093	0.18	0.279	0.378
0:06	0.044	0.0975	0.188	0.288	0.388
0:07	0.05	0.1025	0.197	0.298	0.399
0:08	0.056	0.1075	0.206	0.309	0.412
0:09	0.063	0.113	0.215	0.32	0.425
0:10	0.069	0.118	0.224	0.3315	0.439
0:11	0.076	0.1235	0.234	0.343	0.452
0:12	0.082	0.129	0.244	0.1545	0.465
0:13	0.089	0.1345	0.254	0.366	0.478
0:14	0.095	0.14	0.264	0.3775	0.491
0:15	0.102	0.1455	0.274	0.389	0.504
0:16	0.108	0.1515	0.284	0.4005	0.517
0:17	0.114	0.157	0.295	0.4125	0.53
0:18	0.12	0.1625	0.305	0.424	0.543
0:19	0.126	0.1685	0.315	0.4355	0.556
0:20	0.13	0.1735	0.324	0.446	0.568
0:21	0.131	0.1785	0.332	0.455	0.578
0:22	0.131	0.182	0.337	0.4625	0.588
0:23	0.132	0.185	0.343	0.47	0.597

Fonte: Autor, 2016.

A **Tabela 7** apresenta os picos de vazão calculadas pelo HEC-HMS. Observa-se que o coeficiente de *runoff* possui maior significância para as vazões de pico com TR mais baixo, isso se deve ao fato do terreno saturar, de forma rápida, nas chuvas “maiores”.

Tabela 7 – Vazões máximas para diferentes TR´s do estudo.

	TR=5	TR=10	TR=20	TR=50	TR=100
Vazão máxima (m^3/s)	4,379	6,337	11,455	14,575	17,85

Fonte: Autor, 2016.

3.4 Resultados

Na Hidrodinâmica se estuda o movimento da água e sua interação com o meio físico. Diferente da Hidrologia, que está muitas vezes interessada em um comportamento mais geral da água em uma parte do ciclo hidrológico, a hidrodinâmica está interessada no comportamento específico, com mais detalhamento e, normalmente, em uma escala de espaço e tempo menores (MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015).

A simulação é o resultado da execução do modelo. Nesta execução, a calibração do modelo é indispensável. Pela natureza da simulação, quanto mais sofisticado o modelo, mais calibrações são necessárias. A calibração do modelo é sempre feita com dados obtidos pelo monitoramento. Então fica claro que o sucesso do modelo, da modelagem e da simulação depende da qualidade do monitoramento e que não há nenhum bom modelo sem o uso de dados obtidos do fenômeno monitorado. Assim, a modelagem e o monitoramento não se

confrontam, passando a ser métodos científicos mutuamente complementares, efetuados sempre paralelamente (KOBIYAMA, 2011).

A simulação de modelos matemáticos requer a solução de sistemas de equações, que demandam a utilização de ferramentas computacionais para o processamento dos cálculos (CANHOLI, 2014).

No presente trabalho, utilizou-se o modelo hidrológico HEC-HMS e o hidrodinâmico HEC-RAS mas no mercado existem outros modelos como o SWMM (*Storm Water Management Model*), *software* hidrológico-hidráulico desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency - Usepa*) para a modelagem e simulação do escoamento superficial em áreas urbanas. O SWMM é um modelo dinâmico de transformação chuva-vazão capaz de simular séries de precipitação contínuos ou discretos, bem como os processos hidrodinâmicos na rede hidrográfica (TOMINAGA, 2013). O SWMM utiliza uma abordagem distribuída para o cálculo das vazões, integrando a modelagem da micro e macrodrenagem. Essa simulação integrada da rede de galerias com o escoamento superficial possibilita a simulação de alagamentos (CANHOLI, 2014).

3.4.1 Condições iniciais, de contorno e parâmetros.

As equações (1) e (2) são resolvidas em um domínio restrito e definido e necessita de condições auxiliares. Em outras palavras, cada solução do sistema de equações corresponde a uma condição a priori definida. Portanto, a função e a solução do considerado problema devem satisfazer simultaneamente a condição do domínio e das condições adicionais. Estas condições adicionais são divididas em dois tipos: as condições iniciais e as condições de contorno. As condições iniciais são dadas durante o instante de tempo inicial do cálculo (em geral t = 0s), normalmente no início da simulação, e as condições de contorno são as aplicadas nos limites do espaço físico, ou ainda quando se quer representar alguma estrutura ou restrição dentro do domínio. Para o caso da equação de Saint-Venant, as condições iniciais são compostas pelas vazões e profundidade da lâmina de água (MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015).

Como condição de contorno é necessário que se tenha uma vazão ou altura de lâmina de água na seção inicial e final do trecho simulado. Neste trabalho, adotou-se, por questões de estabilidade, uma vazão para a seção inicial (0,02 m^3) mais o hidrograma calculado pelo HEC – HMS e profundidades para seção final, representadas pela hidrógrafa de marés do porto de Imbetiba, atenuada por calibração feita a partir do levantamento dos níveis em pontos

diferentes do canal. A vazão de entrada pode ser prescrita, ou seja, fornecida pelo usuário e a condição de saída pode ser de saída livre.

As condições iniciais podem ser obtidas pela simulação do trecho de interesse como escoamento permanente obtendo-se vazão ou profundidade. Como condição inicial se tem a vazão e a altura da lâmina de água para todas as seções do trecho (MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015). As vazões obtidas neste trabalho pelo método de Manning – Stickler, seguem esta recomendação.

3.4.2 Simulação: Cenário 1 – Maré de sizígia de 25/10/2007, com chuva de 5 anos na microbacia, sem influência de cheias do rio Macaé.

Com base nos parâmetros citados anteriormente, obteve-se pelo método SCS, utilizando-se o HEC-HMS, o hidrograma para TR = 5 anos (**Gráfico 4**).

Gráfico 4 – Hidrograma para chuva localizada de TR = 5 anos na microbacia do Canal do Capote.

Fonte: Autor, 2016.

Este hidrograma, foi lançado como condição de contorno a montante e a hidrógrafa de maré do dia 25/10/2007 como contorno à jusante, executado o modelo, obteve-se os níveis críticos por seção (interpolada ou não). Agora, com o modelo hidrodinâmico, estes hidrogramas serão propagados na área inundável de interesse para que se obtenha as velocidades máximas e as profundidades máximas, a fim de se criarem os mapas de inundação e de perigo.

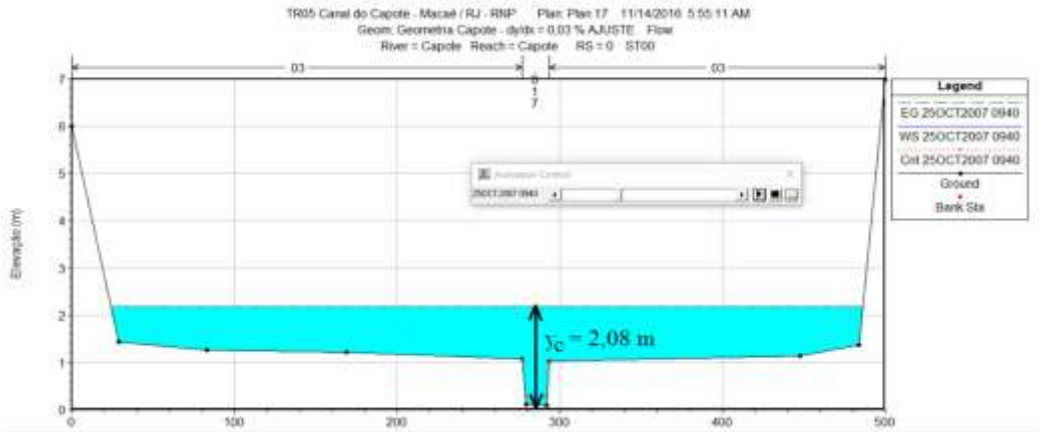
Para rodar a simulação para escoamentos não permanentes, forneceu-se a data de início e fim do evento a ser simulado, que é 25/10/2007 às 08h00. Observar-se-á que a hidrógrafa de marés contém dados de todo o dia (de 00h00 até 23h55), em intervalos de 5 em 5 minutos, sendo que este dado de entrada permitirá uma simulação de 08h00 às 14 h, já que a duração crítica da chuva é de seis horas. É importante que se forneça a mesma data que foi

inserida para os hidrogramas da condição de contorno. Caso esteja sendo realizada a simulação pela primeira vez, é necessário que o usuário ative todas as funções *Programs to Run*, porém, caso o usuário esteja realizando uma simulação pela segunda vez e não modificou a geometria do canal em nenhum aspecto, a função *Geometry Preprocessor* pode ser desativada.

O intervalo de tempo gerado na solução computacional não pode ser maior do que o intervalo dos hidrogramas fornecidos na condição de contorno. Quanto menor for o tempo computacional melhor será o resultado da simulação. Não é interessante reduzir muito o intervalo dos arquivos de saída (*output*), a menos que se esteja interessado em alguma especificidade, pois geram dados desnecessários.

Avaliando-se **o Gráfico 5** observa-se que o nível (mais alto no canal) crítico (y_c) foi atingido às 09h40 da referida data e é de 2,08 m na altura do bairro das Malvinas.

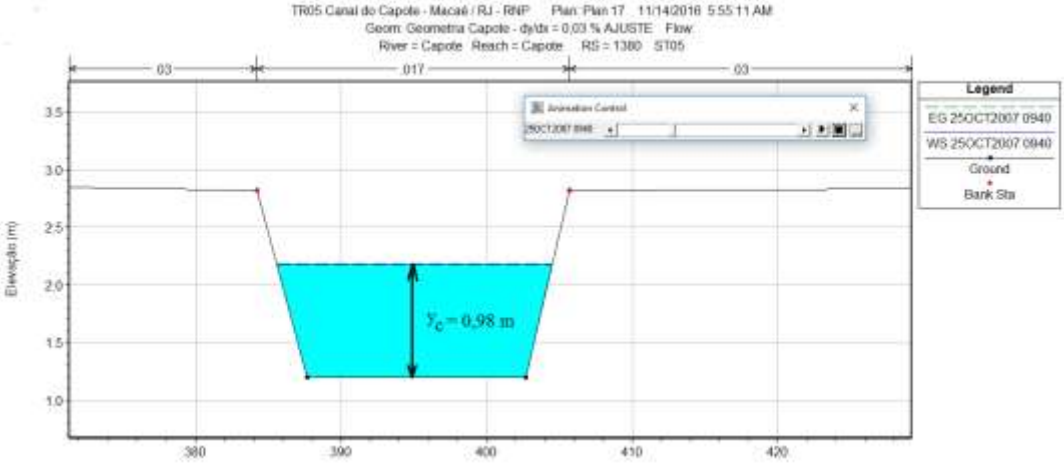
Gráfico 5 – Altura crítica (yc) da onda de cheia propagada para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos na seção transversal da Estação 0 (ponte na entrada do bairro das Malvinas).



Fonte: Autor, 2016.

Neste mesmo horário, a altura crítica (y_c) na estação 1380 (**Gráfico 6**) com o fluxo entrando no canal, próxima a ponte de entrada no bairro das Aroeiras é de apenas 0,98 m, demonstrando o amortecimento da onda de propagação.

Gráfico 6 – Variação máxima do nível da onda de cheia propagada para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos na seção transversal da Estação 1380 (próxima ao *deck* na entrada do bairro das Aroeiras).

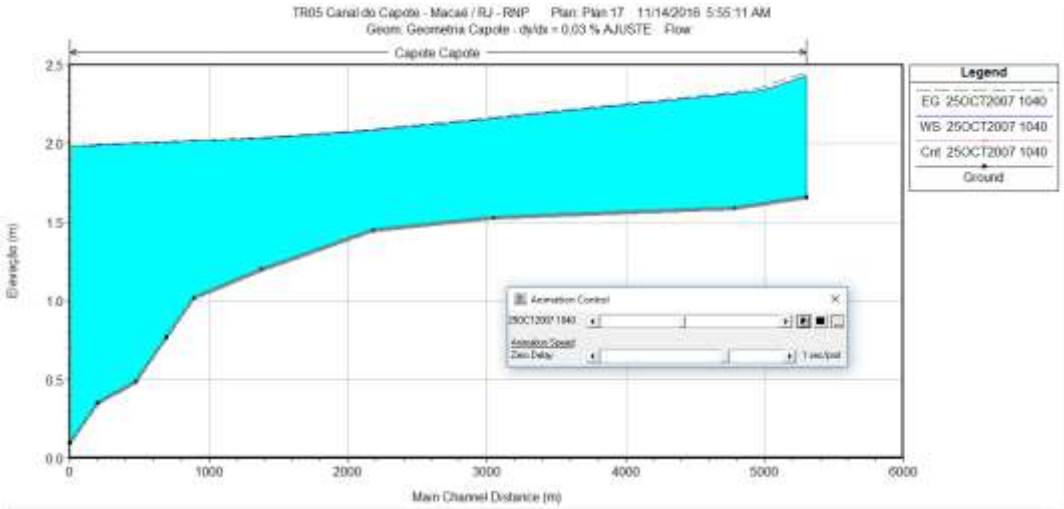


Fonte: Autor, 2016.

O HEC – RAS possui a função *Mixed Flow que* permite definir o regime de escoamentos para crítico, subcrítico ou supercrítico para uma mesma simulação. No presente trabalho, apesar do conhecimento de que na sua totalidade o regime é subcrítico, optou-se pelo regime misto.

Uma das ferramentas de análise das simulações é o perfil longitudinal crítico em 1D (**Gráfico 7**) do canal cheio, que permite através de uma animação, visualizar-se a entrada e saída da onda de propagação do canal, podendo-se também obter as elevações de forma visual.

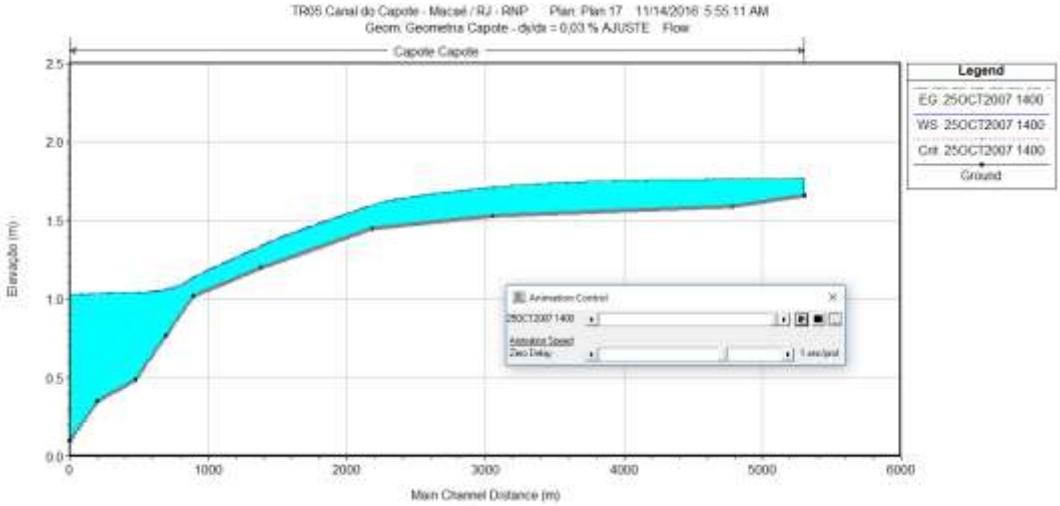
Gráfico 7 – Perfil longitudinal crítico (nível mais alto) para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos.



Fonte: Autor, 2016.

Pode-se também visualizar o canal com sua menor elevação crítica (**Gráfico 8**).

Gráfico 8 – Perfil longitudinal crítico (nível mais baixo) para chuva localizada na microbacia do Canal do Capote para TR = 5 anos.



Fonte: Autor, 2016.

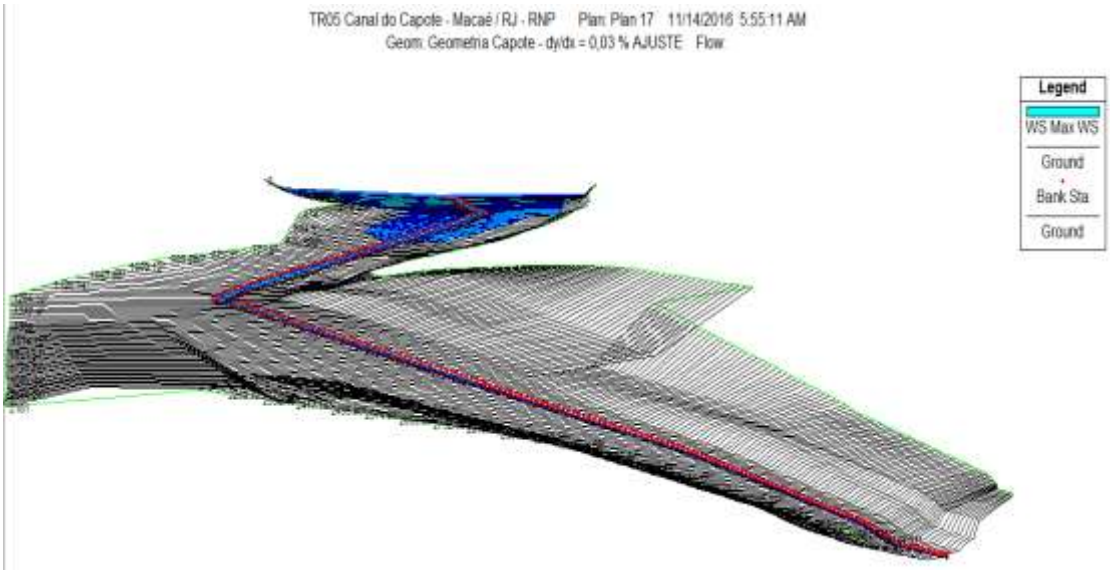
O mapa de inundação pode ser criado de duas maneiras diferentes, através da confecção de uma mancha de inundação a partir de dados observados da inundação ou através da modelagem hidrodinâmica. O primeiro método fornece um mapa com mais exatidão, porém é de difícil criação, pois os dados precisam ser adquiridos em pleno evento de inundação (GIGLIO; KOBIYAMA, 2011). Ainda, pode-se recuperar os dados das inundações através de registros deste evento, ou seja, além da coleta em campo, estes dados também podem ser recuperados através de fotografias, vídeos, jornais ou declaração de pessoas presentes no evento.

Outro ponto negativo deste método é a inflexibilidade em criar mapas com períodos de retorno pré-estabelecidos. O segundo método, referente à modelagem hidrodinâmica, utiliza modelos físicos ou matemáticos para a criação dos mapas de inundação. Na metodologia utilizada pelo presente trabalho, este mapa é resultado da modelagem hidrodinâmica. De qualquer forma, para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, é recomendada a utilização cotas do evento de inundação.

Mapa de inundação:

O mapa de inundação (**Gráfico 9**) sempre está relacionado a um período de retorno que é utilizado diretamente na confecção deste. A qualidade do mapa depende da qualidade dos procedimentos que o antecedem e é muito sensível ao modelo digital de terreno.

Gráfico 9 – Mapa de inundação crítica em 3D (nível mais alto) para TR = 5 anos.



Fonte: Autor, 2016.

O HEC-RAS oferece uma gama de relatórios de saída que permitem análises complementares, exportando os dados para uma planilha eletrônica. Na **Tabela 8**, podemos visualizar as variações de nível crítico y_c canal do Capote nas principais estações, para uma chuva de TR = 5 anos, sob influência de marés de sizígia.

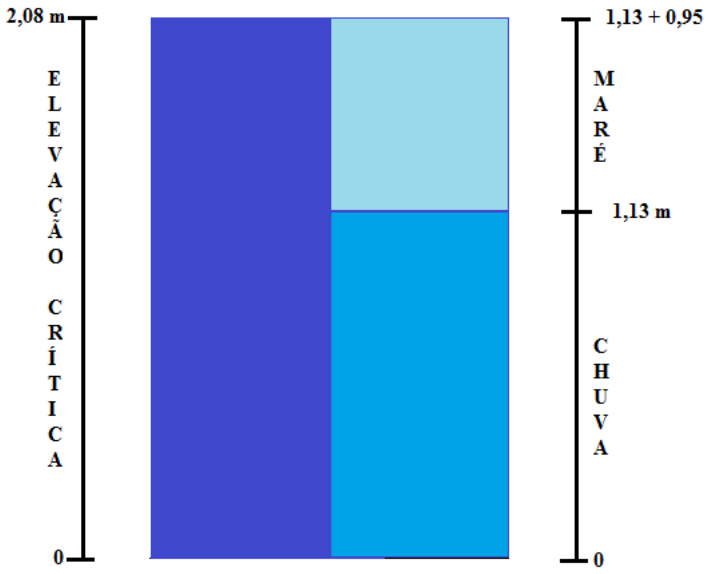
Tabela 8 – Variação do nível do canal do Capote sob influência de maré de sizígia para TR = 5 anos.

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Variação Nível	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Capote	5297	Max WS	4.34	1.66	2.43	0.77	2.45	0.000205	0.64	6.78	9.26	0.24
Capote	4778	Max WS	3.88	1.59	2.32	0.73	2.33	0.000091	0.43	9.11	13.04	0.16
Capote	3047	Max WS	-0.32	1.53	2.19	0.66	2.19	0.000001	-0.04	7.99	12.88	0.02
Capote	2181	Max WS	-1.55	1.45	2.18	0.73	2.18	0.000011	-0.14	10.73	16.32	0.06
Capote	1380	Max WS	-1.8	1.2	2.18	0.98	2.18	0.000004	-0.11	16.67	18.92	0.04
Capote	892	Max WS	-1.92	1.02	2.18	1.16	2.18	0.000001	-0.06	30.91	31.04	0.02
Capote	695	Max WS	-1.96	0.77	2.18	1.41	2.18	0.000002	-0.08	23.7	20.59	0.02
Capote	474	Max WS	-2.03	0.49	2.18	1.69	2.18	0.000001	-0.06	41.71	133.29	0.02
Capote	200	Max WS	-2.38	0.35	2.18	1.83	2.18	0.000001	-0.07	56.61	172.25	0.02
Capote	0	Max WS	-2.88	0.1	2.18	2.08	2.18	0	-0.01	474.02	462.32	0

Fonte: Autor, 2016.

Como conhecemos as variações de altura na exutória (**Tabela 8**) calculadas pela equação de *Manning – Stickler* para cada TR, sem considerar o efeito das marés e o nível crítico calculado pelo modelo hidrodinâmico, podemos afirmar que a variação máxima do nível atribuído ao efeito das marés de sizígia neste ponto é de até 2,08 m – 1.13 m = 0,95m ().

Gráfico 10 – Contribuição da Chuva e Maré para Elevação Crítica do Canal do Capote.



Fonte: Autor, 2016.

3.4.3 Calibração do Modelo

A calibração trata de um ajuste entre simulação e observação, conduzido a partir da manipulação de parâmetros, em relação ao qual o modelo construído apresente sensibilidade. A calibração, ou otimização, é utilizada para buscar a melhor solução de uma função matemática, no caso de um modelo, para representar determinado fenômeno. Assim, a calibração busca o valor de um ou mais parâmetros, que proporcionem o melhor resultado para uma função que dependem destes parâmetros, querendo se alcançar um objetivo (erro máximo aceitável). Procura-se pelos valores de parâmetros que forneçam a melhor similaridade entre os valores calculados pelo modelo e os valores observados. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados ao se calibrar um modelo. Apenas os parâmetros que se tem menos confiança devem ser modificados em busca do resultado otimizado. De uma forma geral, os dados de campo não devem ser modificados, enquanto que os dados calculados, que normalmente são os mais incertos, possuem prioridade a serem os parâmetros modificados para a otimização (MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015).

3.4.4 Verificação e Validação do Modelo

Validação é uma comparação entre simulação e observação a partir de um cenário distinto daquele que foi utilizado na calibração. Testes de verificação são necessários para identificar se a implementação de um método numérico foi realizada de forma coerente. A

verificação avalia se as formulações matemáticas e numéricas foram aplicadas corretamente, ou seja, se o código é consistente. Os testes de validações são necessários para avaliar se a teoria que envolve as equações aplicadas são adequadas para um fenômeno em específico. Então, a validação avalia a exatidão do resultado de um modelo numérico, baseando-se na comparação entre os resultados computacionais e os dados experimentais. Assim sendo, verificação e validação são processos primários para quantificar e qualificar a precisão e a exatidão dos resultados computacionais de determinado código (MONTEIRO; KOBIYAMA; ZAMBRANO, 2015).

Os modelos HEC – HMS e HEC – RAS, são modelos já utilizados, e consequentemente, validados em todo o mundo. O modelo implementado no presente trabalho, foi validado também pela comparação dos resultados da simulação seguinte do Cenário 2 (**Figura 20**), onde comparando-se a figura do resultado da simulação à mancha de inundação real na Foto 3 feita por um *drone*, verifica-se a semelhança.

3.4.5 Simulação: Cenário 2 – Sizígia, chuva com TR = 100 anos na microbacia do Canal do Capote e inundação pelo rio Macaé.

O mapa mostra (em vermelho) toda a área que seria inundada no entorno do Canal do Capote, com base num estudo feito pelo CPRM / IPT para uma chuva de TR = 100 anos. Em alguns casos assumem-se valores empíricos razoáveis através de observações e experiências reais para facilitar a resolução analítica da teoria hidráulica destes canais (CHOW, 1959).

Figura 20 – Mapa de inundação do Canal do Capote (azul) X Inundação do rio Macaé sob influência de picos de chuva e marés de sizígia (vermelho).

Fonte: Adaptado de CPRM / IPT, 2012.

Foto 3 – Trecho inundado, paralelo ao Canal do Capote, na circunferência preta da figura 20, vê-se o mesmo trecho.

Fonte: Cortesia DOM fotográfico, Macaé / RJ, 2016.

3.5 Conclusões

O estudo criou um modelo que permite testar e avaliar inundações em microbacias urbanas em áreas estuarinas, através de um modelo hidrológico - hidrodinâmico que incorpora as características físiográficas da bacia (MDT, escoamento superficial, nível e vazão do canal principal), bem como, a análise do regime das marés relacionados ao canal e a intensidade de chuva estimadas.

Uma premissa básica que sempre deve ser considerada na modelagem matemática é a de que os modelos nunca podem gerar resultados melhores do que os dados que lhes são fornecidos como “entradas” (LUGON JR; COSTA; RODRIGUES, 2016).

A sequência de simulações feitas apresentou os diversos cenários para as chuvas no canal com TR´s de 5, 10, 20, 50 e 100 anos, considerando-se a maré de sizígia mais crítica (nível de maré) do ano. Incluiu-se também uma simulação, considerando-se o nível do Rio Macaé, como condição de fronteira a jusante, obtido a partir de estudo feito pela CPRM para toda a cidade, nele podemos observar elevação, acima dos níveis normais, de até aproximadamente 2,6 m no nível do canal na altura dos bairros de Botafogo e Malvinas. O pico ocorre num momento de pico da maré de sizígia em que a água acumulada no canal pela chuva intensa ainda está escoando.

Os resultados apresentados mostraram bastante consistência com dados observados, considerando-se a complexidade dos ambientes, fornecendo informações que facilitam a construção de mapas e definição de cotas de inundação (ou cota de segurança) úteis no licenciamento e construção de novos empreendimentos que, dependendo da localização do

terreno, vão demonstrar que a construção está protegida de eventuais cheias em rios e/ou canais próximos, evitando perdas de investimento e até vidas.

Foi observada também em medições feitas antes e uma depois da **comporta** existente na entrada do bairro das Malvinas, a grande influência desta, tanto na dimensão temporal como espacial da onda de propagação, tanto na subida como descida do fluxo, nesta, ela chega a escavar o fundo do canal numa profundidade de 8 m, à jusante desta.

Estruturas mal dimensionadas comprometem, além da segurança, o bom uso dos recursos financeiros do Estado que, em geral, são escassos e devem ser usados em outras áreas, também importantes à população. A boa engenharia deve buscar a ótima relação entre estes dois aspectos, considerando, acima de tudo, o bem-estar do ser humano e o uso sustentável dos recursos naturais (SILVEIRA, 2010).

Como resultados, o *software* permite ainda gerar os seguintes relatórios, não discutidos no presente trabalho: Curvas-chave, tabelas de propriedades hidráulicas, variações das propriedades por seções (interpoladas ou não) e diversos tipos de relatórios tabulares, customizados através da exportação para planilhas de cálculo.

No presente trabalho, utilizou-se métodos sintéticos. Não se deve esquecer que os métodos sintéticos são válidos desde que aplicados às condições que se aproximem daquelas para as quais foram desenvolvidos e que algumas vezes, são utilizados sem as devidas adaptações e análises mais criteriosas. Neste sentido, a técnica da análise de sensibilidade pode, em caráter preliminar, representar um instrumento útil, uma vez que permite a avaliação da importância dos parâmetros de entrada sobre o resultado final da vazão de pico e do respectivo hidrograma de projeto, importantes aos dimensionamentos de estruturas hidráulicas (SILVEIRA, 2010).

As simulações efetuadas até agora no Canal do Capote mostram baixa influência nas inundações devido às pequenas alterações da forma das seções transversais do canal, sua natureza (tipo de fundo, presença de vegetação etc.) e lançamentos de determinadas vazões adicionais ao longo do canal. Acredita-se que um estudo mais detalhado da comporta, com possíveis alterações em sua forma atual, constantes limpezas (retirada de entulhos, macrófitas etc.), possam melhorar a sua dinâmica.

As maiores influências sobre as inundações no canal e nas várzeas próximas ocorrem: por conta das cheias do rio Macaé, influência das marés de sizígia, até 0,95 m de elevação, quando combinadas a chuvas intensas - e obstruções em pontes e tubulações.

De maneira geral, os resultados mostram também que a vazão de pico do canal do Capote é crescente com o valor do TR, e o regime de escoamento no canal do Capote é, em sua totalidade, do tipo subcrítico, mesmo em período de inundações.

A relação entre as vazões de pico e área molhada, principalmente na região mais baixa do canal, são fortemente não lineares, devido ao efeito de espalhamento do fluxo.

Analisando-se o tempo de subida e retorno da onda de propagação em relação ao ciclo das marés, observa-se a manutenção de um nível mínimo no canal devido a proximidade de suas durações, ou seja, quando uma onda está subindo, já existe outra descendo, gerando velocidade quase nula entre determinadas seções do canal.

Dentre as variáveis estudadas, o valor do nível do canal foi o parâmetro que se mostrou mais influente na determinação das vazões de pico dos hidrogramas de projeto e o que mais alterou as características da estrutura hidráulica avaliada.

Para pequenas mudanças da declividade, as variações nos valores do nível do canal são significantes.

Quanto ao posicionamento do hidrograma em relação a hidrógrafa de marés, observou-se maiores elevações no nível do canal quando as chuvas iniciam no terço inferior de ascensão da hidrógrafa.

3.6 Trabalhos futuros

1. Qualquer modelo é uma aproximação à realidade. Para ter melhor modelo, necessita-se observação do sistema, ou seja, monitoramento.
2. Realização de cursos de capacitação em hidrologia e hidrometria. O objetivo destes cursos é formar técnicos da área de recursos hídricos, capazes de monitorar, calcular e analisar os principais processos hidrológicos que ocorrem em microbacias hidrográficas;
3. Modelagem Hidrodinâmica 2D completa com HEC-RAS e MDT renderizado com resolução de pelo menos 1 m entre curvas de nível, incluindo-se o estudo da influência no canal das estruturas existentes: decks, pontes e manilhas. Há de se ressaltar que os sistemas de Informações Geográficas (SIG) ajudam a melhor definir as características fisiográficas das bacias, minimizando as incertezas na determinação destas características;
4. Como o HEC-RAS já possui um módulo para modelagem de comportas (2D hidrodinâmico completo), sugere-se um estudo mais aprofundado da mesma.

5. Modelagem Hidrodinâmica 3D completa do canal e sua área de influência, preferencialmente com a ferramenta MOHID, que já foi utilizada em diversos estudos nesta região;
6. Levantamento topobatimétrico de todas as sub-bacias hidrográficas com influência sobre o canal do Capote, utilizando-se novas tecnologias, tais como o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) *e Real Time Kinemati*c (RTK);
7. Para ampliação dos resultados e melhoria da qualidade da informação obtida a partir dos modelos, sugere-se ainda um refinamento da qualidade do terreno digital a partir de levantamentos topo-batimétricos mais apurados, estudo mais detalhado da influência de outros canais na microbacia, bem como, do próprio rio Macaé.

3.7 Agradecimentos finais

A Deus e todos que sempre estiveram por perto, em particular a FAPERJ e CNPq pelo apoio.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/>. Acesso em: 5 nov. 2015.

AMARAL, Karen Juliana do. **Estuário do Rio Macaé:** modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2003.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. ABRH. 2. ed. Porto Alegre. 2011.

BARBOZA, A. P. **Estudo Hidrológico de Vazões Máximas da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé.** Projeto de Graduação. UFRJ / POLI Curso de Engenharia Ambiental, 2014.

BRAUNSCHWEIG, F.; FERNANDEZ, L. **MOHID:** Manual do Usuário. Campos dos Goytagazes: Essentia Editora, 2010.

CAMPOS, R. G. D. **Análise da Representatividade de Diferentes Hipóteses de Modelagem Matemática para Definição de Manchas de Inundações em Áreas Urbanas-Estudo de Caso da Cidade de Governador Valadares.** Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2012.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** 2. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2014.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology,** McGraw Hill, 1988.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGRAW-HILL Book Company, 1959. 680p.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem dos sistemas ambientais.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CORDERO, A.; MEDEIROS, P. A.; TERAN, A. L. **Medidas de Controle de Cheias e Erosões.** Centro de Operação do Sistema de Alerta. Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil, 1999. Disponível em: <http://ceops.furb.br/index.php/publicacoes/artigos/doc_details/5-metodos-controle-cheias-1999>. Acesso em: 26 abr. 2016.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil / IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, **Programa Gestão de Riscos a Respostas a Desastres Naturais.** Brasil, 2012.

FGV. **Estudo de cheias no baixo curso do rio Macaé, em especial sobre o núcleo urbano.** Rio de Janeiro, 2004.

GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. In **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.** Maceió: ABRH XIX, 17P, 2011.

IBGE / RMPG – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG, Brasil, 2016. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 11 nov. 2016, 23:20.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente, Relatório de Caracterização da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras – Apêndice. **Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras.** Rio de Janeiro, 2013.

KOBIYAMA. MASATO, **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais.** 3. ed. Florianópolis: UFSC / CTC / ENS / LabHidro, 2011. 242p.

LEMOS, Angelo Teixeira; GHISOLFI, Renato David. Long-term mean sea level measurements along the Brazilian coast: a preliminary assessment. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences,** v. 5, n. 2, p. 331-340, 2010.

LUGON JR, J.; COSTA, V. T. R.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Avaliação do Impacto de Pequena Central Hidrelétrica na Qualidade de Água do Rio Itabapoana Através de um Modelo Computacional.** Instituto Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Modelagem Computacional, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana:** do projeto tradicional à sustentabilidade. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C. **Mapeamento de Perigo de Inundação.** Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN, 2015. 91p.

O DEBATE. **Temporal alaga Macaé.** 2007. Disponível em: <http://www.cotidianosantanaemfoco.wordpress.com/page/21/> Acesso em: 19 jul. 2016.

PAIVA, R. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica de Grandes Bacias:** Rio Solimões. 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A, **Base de dados de apoio às operações de exploração e extração de petróleo da bacia de Campos**, 2016.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas Intensas no Brasil.** 2. ed. Rio de Janeiro: DNOS, 1982. 426p.

PLANO DE BACIA MACAÉ / OSTRAS. Disponível em: <http://www.planomacaeostras.com /index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=43>. Acesso em: 23 set. 2016.

REBELO, J. M. L. **Estudo e Dimensionamento de um canal multi-funções para escoamentos em superfície livre.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2015. 205p

SANTOS, L. C. C. **Estimativa de Vazões Máximas de Projeto por Modelos Determinísticos e Probabilísticos.** 2010. 173 f. Dissertação (M. Sc.) – PPGEA/UFES, Espírito Santo, Brasil, 2010.

SÃO PAULO. **Diretrizes Básicas para projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo.** Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 1998.

SILVEIRA, G. M., **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta.** ,2010. 243 f. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2010.

TCE RJ. **Estudos Socioeconômicos dos Municípios do Estado do Rio de Janeiro – Macaé.** Secretaria-Geral de Planejamento, Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

TAVARES, J. H. S. **Estudo de disponibilidade hídrica do baixo curso do Rio Macaé - RJ utilizando modelagem computacional.** 2011. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense Campus Macaé, Macaé - RJ, 2011.

TOMINAGA, E. N. de S. **Urbanização e Cheias:** medidas de controle na fonte. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre. Ed. Universidade, 2005. 669p.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, R. L. **Análise de consistência de dados fluviométricos.** Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 1985.

UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Redution, UN - United Nations. **Introducing Disaster Risk Reduction and Resilience.** Abr. 2012.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center - HEC. RAS - River Analysis System 5.0.1, *2D* **Modeling User's manual.** Calif. Abr. 2016a.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center - HEC. RAS - River Analysis System 5.0.1, **Hydraulic reference manual.** Calif. Abr. 2016b.

ANEXO A – Reservatórios

As águas doces de maior potencial de aproveitamento, no âmbito das condições físico-climáticas brasileiras, se dão através do armazenamento das águas das chuvas em reservatórios artificiais. Aqueles de maior armazenamento acabam cumprindo duas funções: a função regularizadora e a função de controle de cheias.

A função regularizadora e a função controle de cheias se destacam pelo:

Atendimento caracterizado pelos múltiplos usos, tanto para regularização como controle de cheias, é adotado comumente na gestão de águas.

Sabe-se (**COGERH, 2012**) que, nesses reservatórios, sujeitos às variabilidades de recarga (clima irregular), a eficiência oscila entre o uso intenso e o uso conservativo. O uso mais intenso reduz perdas, mas pode levar o reservatório à exaustão. O uso conservativo diminui os riscos de esvaziamento, mas intensifica perdas (evaporação, sangrias). Portanto a operação eficiente será aquela que produzirá menos perdas e possibilitará maior usufruto das águas armazenadas. O cumprimento da função regularizadora com a máxima eficiência possível é um desafio da gestão.

Os reservatórios normalmente construídos no Brasil são reguladores de vazão. Entretanto, a sua operação, num cenário de chuvas intensas e recepção de grandes vazões, permite que os mesmos retardem a passagem dessas vazões, fazendo com que as vazões efluentes sejam reduzidas, caracterizando assim o seu efeito controlador de enchentes. Alguns reservatórios produzem esses efeitos em maior magnitude que outros, dependendo da sua capacidade de retardamento da passagem das águas. O volume é retido nos reservatórios, também em função dos espaços que os mesmos dispuserem para acomodação temporária do mesmo.

Reservatórios apenas com vertedouros:

Neste tipo de reservatório o retardamento acontece em razão do estreitamento causado pela passagem no sangradouro, fazendo com que as águas “esperem” o seu momento de saída. Esses reservatórios, portando, produzem abrandamentos sem controle, exatamente por não se tratarem de reservatórios construídos para a função de controle de cheias.

Reservatórios com vertedouros e comportas:

Esses reservatórios são construídos não só para exercer funções de regularização, mas também para amortecerem cheias de maneira controlada. Este trabalho tem como proposta a simulação de um cenário visando proteger o Baixo Curso do Rio Macaé das grandes cheias.

A atenuação de cheia controlada é sempre realizada em tempo real e pressupõe o uso de uma regra operacional cujo equacionamento envolve um conjunto de variáveis que limitam as ações de controle. No caso específico do Rio Macaé, neste estudo, não serão contempladas as variáveis relativas a incertezas associadas às previsões climáticas e à oportunidade de viabilizar um sobre volume eventual para regularização, preocupando-se apenas com a limitação de nível do espelho d’água em razão da existência de núcleos urbanos na bacia hidráulica, expostos à elevação do espelho d'água e às restrições em relação as vazões liberadas, para prevenir transbordamentos da calha de jusante e assim evitar inundações nas áreas ocupadas.