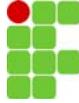


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE**



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

**ESTUDO DE PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO DE CHEIAS DO RIO
MACAÉ COMO SUBSÍDIO AO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA
REGIÃO HIDROGRÁFICA VIII**

LUIZA PAULA DA SILVA TAVARES

**MACAÉ/RJ
2017**

LUIZA PAULA DA SILVA TAVARES

ESTUDO DE PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO DE CHEIAS COMO
SUBSÍDIO AO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO
HIDROGRÁFICA VIII

Relatório de Dissertação apresentado
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, área de
concentração Gestão e Planejamento
de Recursos Hídricos / Modelagem
Computacional.

Orientação: Professor D.Sc Jader
Lugon Junior (Doutor em Modelagem
Computacional - UERJ)

Co-orientação: Professor D.Sc. Julio
Cesar de Faria Alvim Wasserman
(Doutor em Oceanografia Química
pela *Université de Bordeaux I* -
França)

MACAÉ/RJ
2017

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

T231e Tavares, Luiza Paula da Silva
Estudo de propostas de mitigação de cheias como subsídio ao plano de recursos hídricos da região hidrográfica VIII / Luiza Paula da Silva Tavares - 2017.
62 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Jr
Coorientador: Julio Cesar de Faria Alvim Wasserman

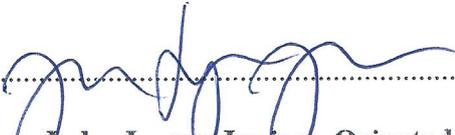
Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.
Referências: f. 59 a 62.

1. Modelagem Computacional. 2. MOHID Land. 3. Rio Macaé. 4. Cheia. 5. Rede de Drenagem. I. Lugon Jr, Jader, orient. II. de Faria Alvim Wasserman, Julio Cesar, coorient. III. Título.

Relatório de Dissertação intitulado *Estudo de propostas de mitigação de cheias do rio Macaé como subsídio ao plano de recursos hídricos da região hidrográfica VIII* elaborado por Luiza Paula da Silva Tavares e apresentado publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, na área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovado em 28/09/2017

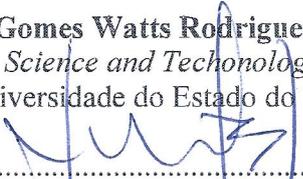
Banca Examinadora:


.....
Jader Lugon Junior - Orientador

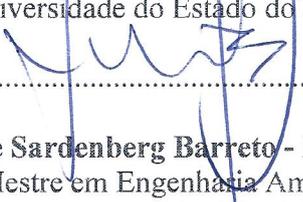
Doutor em Modelagem Computacional / UERJ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense


.....
Julio Cesar de Faria Alvim Wasserman - Co-orientador

Doutor em Oceanografia Química / *Université de Bordeaux I* (França)
Coordenador da Rede UFF de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Universidade Federal Fluminense


.....
Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues - Examinador Externo

PhD pela School of Marine Science and Technology / University of Newcastle Upon Tyne
Universidade do Estado do Rio de Janeiro


.....
Guilherme Sardenberg Barreto - Examinador Externo

Mestre em Engenharia Ambiental / IFF
Prefeitura Municipal de Macaé
Pesquisador UFRJ / NUPEM

Aos meus pais, Amilson e Sonia,
a quem nutro eterno amor e gratidão.

A Gabriel, Leonardo e Laura,
inspiração e razão do meu viver.

À minha terra Macaé e seus filhos,
por sua natureza, seus encantos e vitalidade.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Amilson e Sonia, por me ensinarem o caminho do bem e da honestidade e por nutrirem em mim o gosto pela natureza e pelos estudos.

Ao meu marido Gabriel, meu melhor amigo e incentivador, pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente nos de incerteza, muito comuns para quem tenta trilhar novos caminhos.

Aos meus filhos, Leonardo e Laura, por simplesmente existirem na minha vida, e serem a grande força motriz dos meus sonhos e empreendimentos.

Às minhas tias, Maria Jannet e Maria Luiza, que, com seu carinho e apoio constantes, não mediram esforços para que eu desenvolvesse e concluísse esse e tantos outros projetos de minha vida.

Ao meu orientador Jader Lugon Jr., pela amizade, paciência e incentivos constantes; por me oferecer a oportunidade de trilhar novos caminhos na minha trajetória acadêmica, sempre com seu apoio, além de seu vasto conhecimento e experiência no corpo de conhecimentos necessários à realização deste.

Ao IFF e todo o seu corpo de professores, por ter investido em minha formação e ter me concedido a oportunidade de ampliar meus horizontes; em particular aos professores Maria Inês Paes Ferreira e José Augusto Ferreira da Silva, a quem sou extremamente grata pelos ensinamentos transmitidos.

À querida colega Nélia Paula Freesz, da Superintendência Regional Macaé e Ostras - SUPMA, do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), por não medir esforços em me auxiliar todas as vezes em que precisei, e, em especial, a Leonardo Fernandes, por ceder documentos e estudos importantes sobre o Rio Macaé.

À toda equipe do Núcleo de Alerta de Cheias, do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), em especial à Cinthia Avellar Martins e Ayssa Soares, que gentilmente cederam séries históricas de monitoramento do Rio Macaé.

Aos queridos colegas da turma de 2015, pela amizade, apoio e força nos momentos de difíceis, e como não, pelas risadas, churrascos e memoráveis momentos de descontração.

RESUMO

Este trabalho apresenta, em sua primeira parte, uma revisão bibliográfica sobre as cheias urbanas, centradas na bacia hidrográfica do rio Macaé. A pesquisa reafirma a necessidade e relevância dos estudos de cheia para a região de Macaé, tanto pelo expressivo registro de ocorrências como pela carência de estudos recentes na área. Nessa perspectiva, na segunda parte, o objetivo do trabalho foi construir um modelo hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Macaé (RH-VIII) utilizando o MOHID *Land* e realizando a simulação de cenários voltados ao controle das cheias na região urbana do município. Os cenários simulados compreenderam: *i.* barramento localizado a montante da Ponte do Baião (Bicuda Pequena, Macaé); e *ii.* aumento do Coeficiente de Manning no canal (de 0,035 para 0,08). Os resultados indicam que as vazões máximas obtidas foram compatíveis com estudos anteriores, (BARBOZA (2014); Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013)). A análise dos hidrogramas de cheia ($m^3 \cdot s^{-1}$) indica que, dentre as intervenções simuladas, o aumento do coeficiente de rugosidade (n) nos trechos retelinizados obteve os maiores efeitos na atenuação dos picos de cheia no estirão urbano da cidade de Macaé. Mais estudos devem ser realizados sobre os tipos de obstáculos, vegetação e outros “empecilhos” que possam aumentar o coeficiente de rugosidade (n), e resultar num maior controle das cheias urbanas no município.

Palavras-chave: *Modelagem computacional, Cheia, Enchente, Alagamento, Inundação, Infiltração, MOHID Land, Rede de drenagem, Runoff, Gestão de bacia, modelagem hidrológica, Bacia hidrográfica, Rio Macaé.*

ABSTRACT

This paper presents, in its first part, a bibliographical review about urban floods, focused on the application in the catchment area of the Macaé river. The research reaffirms the demand and relevance of flood studies for the Macaé region, both for the expressive use of occurrences and for the lack of recent studies in the area. In this perspective, in the second part, the objective of the work is to construct a hydrological model of the Rio Macaé river basin (RH-VIII), using MOHID Land software and performing a simulation of scenarios for flood control in the urban area of the municipality. The simulated scenarios: *i.* Dam located upstream of the Baião Bridge (Bicuda Pequena, Macaé); and *ii.* Increase Manning Coefficient within channel (0.035 to 0.08). The results indicate that as maximum flows obtained were compatible with previous versions, (BARBOZA (2014); Water Resources Plan (INEA, 2013)). An analysis of the flood hydrographs ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) indicates that, among the simulated interventions, the increase of the roughness coefficient (n) in the retinized stretches obtained larger than the attenuation of the non-urban spruce peak of the Macaé city. More information should be given about the types of obstacles, vegetation and other "obstacles" that increase the roughness coefficient (n), and result in a greater control of urban floods in the municipality.

Keywords: Computer modeling, Flood, Infiltration, MOHID Land, Drainage network, Runoff, Basin management, hydrological model, River basin, Macaé river.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO CIENTÍFICO 1

FIGURA 1: HIDROGRAMA DE UMA ÁREA URBANIZADA E NÃO URBANIZADA	18
FIGURA 2: SISTEMA DE EQUAÇÕES REGIDAS PELO MOHID <i>LAND</i>	25
MAPA 1: REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS (RH-VIII)	26
MAPA 2: CARTA IMAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ	27
MAPA 3: COMPARTIMENTAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ	28
FIGURA 3: PERFIL LONGITUDINAL DO RIO MACAÉ	29

ARTIGO CIENTÍFICO 2

MAPA 1: REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS	40
FIGURA 1: FLUXOGRAMA DAS INTERFACES GRÁFICAS PRESENTES NA PLATAFORMA MOHID	42
FIGURA 2: DETALHE DA LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE NA INTERFACE GIS DO MOHID STUDIO	42
FIGURA 3: CONSTRUÇÃO DO <i>GRID</i> DE 250M SOBRE A REGIÃO DE MACAÉ	43
FIGURA 4: DELIMITAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ, OBTIDA PELO MOHID <i>LAND</i>	44
FIGURA 5: HIDROGRAMAS DE CHEIA NA PONTE DO BAIÃO, COM E SEM RESERVATÓRIO, PARA TR DE 20 E 50 ANOS	54
FOTOGRAFIA 1: SISTEMA DE CAPTAÇÃO DA CEDAE, LOCALIZADO NAS PROXIMIDADES DA PONTE DO BAIÃO, BICUDA PEQUENA. ÁREA PREVISTA PARA O RESERVATÓRIO	54

FIGURA 6: HIDROGRAMAS DE CHEIA NA FOZ DO RIO MACAÉ, COM E SEM RESERVATÓRIO, PARA TR DE 20 E 50 ANOS	55
FIGURA 7: HIDROGRAMAS DE CHEIA NA FOZ DO RIO MACAÉ, COM E SEM ALTERAÇÃO NO COEFICIENTE DE <i>MANNING</i> , PARA TR DE 20 E 50 ANOS	55
FOTOGRAFIA 2: TRECHO DO RIO MACAÉ, NA PORÇÃO SITUADA NAS PROXIMIDADES DA TERMOMACAÉ. DETALHES DA VEGETAÇÃO SITUADA ÀS MARGENS DESSE TRECHO	56
FOTOGRAFIA 3: TRECHO DO RIO MACAÉ, NA PONTE DO BAIÃO, COM DETALHE PARA A MATA CILIAR	56
FIGURA 8: HIDROGRAMAS DE CHEIA NA FOZ DO RIO MACAÉ, SEM INTERVENÇÃO, COM BARRAGEM, E COM AUMENTO DO COEFICIENTE DE <i>MANNING</i> NO CANAL, PARA TR DE 20 E 50 ANOS	57

LISTA DE QUADROS E TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

TABELA 1: DISTRIBUIÇÃO DE PESSOAS ATINGIDAS POR DESASTRES NATURAIS EM 2012	16
TABELA 2: DISTRIBUIÇÃO DE PESSOAS ATINGIDAS POR EVENTOS MAIS SEVEROS	17
QUADRO 1: PRINCIPAIS EVENTOS DE CHEIAS EM MACAÉ, DE 1998 A 2015	19
QUADRO 2: TABELA SÍNTESE DAS MEDIDAS ESTRUTURAIS PARA GESTÃO DE CHEIAS	22
QUADRO 3: ALGUNS EXEMPLOS DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS, SUAS VANTAGENS E DESVANTAGENS	23

ARTIGO CIENTÍFICO 2

TABELA 1: COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE <i>MANNING</i> POR TIPOS DE USOS DO SOLO	49
QUADRO 1: TEMPO DE RECORRÊNCIA (TR) PARA CHUVAS DE PROJETO EM SISTEMAS DE DRENAGEM	52
TABELA 2: PARÂMETROS DE EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS	53
TABELA 3: COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS COM ESTUDOS ANTERIORES, COM TR DE 20 E 50 ANOS	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CBRJ	Corpo de Bombeiros do Rio de Janeiro
CEADE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos
CN	<i>Curve Number</i>
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNOS	Departamento Nacional de Obras e Saneamento
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
HEC-HMS	<i>Hidrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPGA	Instituto de Planejamento Urbano e Gestão Ambiental
IST	Instituto Superior Técnico
MARETEC	<i>Marine and Environmental Technology Research Center</i>

MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MOHID	<i>Modelling Hydrodynamic System</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NUCASE	Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PRH	Plano de Recursos Hídricos
RH	Região Hidrográfica
SEA	Secretaria de Estado do Ambiente
SEDEC	Secretaria Nacional de Defesa Civil
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shutter Radar Topography Mission</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TC	Tempo de Concentração
TR	Tempo de Retorno ou Tempo de Recorrência
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UTE	Unidade Tratamento de Efluentes
UTL	Universidade Técnica de Lisboa

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
APRESENTAÇÃO	9
ARTIGO CIENTÍFICO 1	11
RESUMO	11
ABSTRACT	11
INTRODUÇÃO.....	13
Marco legal da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil	14
O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras	15
Panorama das cheias urbanas: do Brasil à Macaé.....	15
Cheias urbanas: motivadores, abordagens e técnicas de mitigação	17
Modelagem aplicada ao estudo de cheias e inundações.....	22
HEC-HMS e HEC-RAS.....	23
SWMM	23
MOHID <i>Land</i>	24
Bacia Hidrográfica do Rio Macaé no contexto das cheias e inundações	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
ARTIGO CIENTÍFICO 2	37
RESUMO	37
ABSTRACT	37
INTRODUÇÃO.....	39
METODOLOGIA	40
Área de Estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Macaé	40
A Plataforma MOHID.....	40
Etapas da construção do modelo	42
Localização da área de interesse	42
Criação do modelo digital de terreno (MDT)	43
Delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica	44

Construção das seções transversais.....	45
Ajuste dos Coeficientes de Manning	45
Chuva de Projeto.....	46
Cálculo do CN.....	51
Alternativas de intervenção para o controle das cheias	51
RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
Comparação de resultados com estudos anteriores.....	53
Barragem de contenção de cheias	53
Aumento do Coeficiente de Manning nos trechos retelinizados	55
Comparação final das simulações.....	57
CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

APRESENTAÇÃO

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, 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 a 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 sobre a problemática das cheias e inundações no município de Macaé, apresentando interesse social, ambiental e econômico. Embora a bibliografia disponível em outros países e regiões do 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, *et al.*, 2015).

Partindo da motivação gerada pela importância do problema atual das cheias e considerando os métodos e técnicas em drenagem urbana para o equacionamento desse problema, objetiva-se, com este trabalho, avaliar o efeito de intervenções para mitigação de cheias urbanas na região de Macaé, através da modelagem computacional. Também objetiva-se com o mesmo subsidiar o Plano de Recursos Hídricos da região Macaé / Ostras, e, portanto, a gestão de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Macaé.

No primeiro artigo desse trabalho, intitulado “Propostas de mitigação de cheias urbanas: estudo de caso do rio Macaé”, é realizada uma revisão bibliográfica geral sobre as cheias urbanas no Brasil, apresentando:

- Marco Legal da gestão de recursos hídricos, destacando o Plano de recursos Hídricos da região Macaé / Ostras, e a urgência do apêndice do Relatório de Cheias;
- Panorama das cheias urbanas no país, pesquisa documental que reafirma a necessidade de estudos sobre cheias urbanas no país e no loco em questão;
- Estado da arte das técnicas empregadas para a gestão de cheias, demonstrando a atual tendência quanto às práticas de drenagem urbana; e
- Bacia hidrográfica do rio Macaé no contexto das cheias e inundações, que contempla a caracterização da bacia e apresenta os principais estudos anteriores voltados ao controle de cheias na região.

Verificou-se que os trabalhos centrados no controle de cheias e propostas de mitigação para a região de Macaé, são escassos e destoam das atuais práticas evidenciadas na literatura. Futuros estudos de cheias centrados na região devem avaliar os efeitos das novas práticas em drenagem urbana sob a cheia no município de Macaé. Tais práticas podem ser utilizadas de maneira integrada entre si e com as demais técnicas já implementadas do sistema de drenagem urbana tradicional, bem como ser simuladas e avaliadas por meio da modelagem computacional.

No segundo artigo desse trabalho, *intitulado* “Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o MOHID Land”, é apresentada a descrição metodológica da modelagem, abrangendo as etapas de:

- Construção do modelo digital de terreno (MDT);
- Delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Macaé (RJ);
- Descrição de demais parâmetros considerados na modelagem; e
- Detalhamento sobre os cenários de intervenção simulados: barramento de contenção de cheias na Ponte do Baião e aumento do Coeficiente de Manning nos trechos retelinizados do Rio Macaé.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Mitigação de cheias como subsídio ao plano de recursos hídricos da região hidrográfica VIII¹

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as cheias urbanas, centradas à aplicação na bacia hidrográfica do rio Macaé. As principais áreas temáticas pesquisadas foram: (i) Marco legal da gestão de recursos hídricos; (ii) Panorama das cheias urbanas no Brasil, orientada ao município de Macaé; (iii) Técnicas de controle e mitigação de cheias urbanas; (iv) Modelagem hidrológica e computacional aplicada ao estudo de cheias e inundações; e por fim, (v) Caracterização da bacia hidrográfica do rio Macaé, com enfoque no contexto das cheias e inundações. A pesquisa reafirma a necessidade e relevância dos estudos de cheia para a região, tanto pelo expressivo registro de ocorrências como pela carência de estudos recentes na área. Seguindo a atual tendência praticada em gestão de cheias, as propostas para o município devem ser pautadas em intervenções integradas e que considerem as peculiaridades da bacia hidrográfica. As técnicas compensatórias e a renaturalização de rios e córregos são duas vertentes de destaque nesse contexto. A modelagem da bacia e simulação dessas medidas fornecerá resultados cuja proposta é servir de subsídio ao Plano de Bacia e demais órgãos competentes.

Palavras-chave: *Modelagem computacional, Cheia, Enchente, Alagamento, Inundação, Infiltração, Mohid Land, Rede de drenagem, Runoff, Gestão de bacia.*

Flood mitigation as a subsidy to water resources plan for the VIII river basin district

ABSTRACT

This article presents a literature review about the urban flooding, centered at practical application on the Macaé river basin. The main researched topics were: (i) Legal framework of water resources management; (ii) Overview of urban flooding in Brazil, focusing on the city of Macaé; (iii) Methods for the control and mitigation of urban flooding; (iv) Hydrological and computational modeling applied to the study of floods; and finally, (v) Characterization of the Macaé river basin, with a focus in the context of floods. The research confirms the necessity and relevance of flood studies for the region, both through the expressive record of flooding events as through the lack of recent studies in the area. Following the current trend practiced in flood management, proposals for the city should be based on integrated interventions that consider the peculiarities of the basin. Compensatory techniques and river and stream restorations are two

¹ Este trabalho faz parte da dissertação “Estudo de propostas de mitigação de cheias como subsídio ao plano de recursos hídricos da região hidrográfica VIII”, apresentada ao IFFluminense.

prominent approaches to this context. The modeling of the basin and simulation of these measures should provide data that would support the Basin Plan and other relevant public bodies.

Key-words: *Computational Modeling, Full, Flood, flooding, flood, Infiltration, Mohid Land Drainage network, runoff, watershed management.*

INTRODUÇÃO

O adensamento demográfico em ambientes urbanos é cada vez maior, especialmente no Brasil, fenômeno que gera um crescimento desordenado e acelerado, provocando uma série de mudanças no ambiente. Fenômenos como a rápida urbanização, associados à inexistência ou ineficiência de ações de planejamento territorial, contribuem à geração de processos conflitivos de uso e ocupação do solo. Características marcantes da ocupação desordenada são notáveis principalmente nas áreas inferiores do relevo, onde muitas regiões de risco de inundação estão sujeitas à ocupação (GUERRA e CUNHA, 2001).

Nesse contexto, há destaque para o problema da ocupação inadequada das planícies fluviais e conseqüente impermeabilização das bacias hidrográficas, trazendo como decorrência os problemas das cheias e inundações. A ocupação das planícies fluviais é processo secular com componentes históricas marcantes, definindo um caráter condicionante da vida humana. Os rios possuem uma importância histórica fundamental no desenvolvimento das civilizações e suas margens representam uma região preferencial à ocupação, condicionada aos usos múltiplos das águas (GUERRA e CUNHA, 1998).

A questão das cheias, por outro lado, a princípio um fenômeno de ocorrência natural, é agravada por características intrínsecas do relevo. Sob a ótica da geomorfologia fluvial, os rios constituem agentes condicionantes no transporte de materiais intemperizados das áreas elevadas para as mais baixas (GUERRA e CUNHA, 1998). O clima também possui relevância na questão. No estado do Rio de Janeiro, por exemplo, a maior incidência de chuvas situa-se entre os meses de outubro a março (INMET, 2015), contribuindo à ocorrência do fenômeno.

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

De maneira geral, a solução para muitas questões relativas à gestão dos recursos hídricos está centrada na adoção de medidas estruturais e não estruturais (TUNDISI, 2003). No caso específico do controle das cheias, há uma crescente preocupação voltada à adoção de medidas não estruturais, de natureza preventiva. Há destaque para o disciplinamento do uso e ocupação do solo; o zoneamento de áreas inundáveis; o seguro contra inundações; os sistemas de previsão de enchentes e os sistemas de alerta e defesa civil (MILLAR, 1994).

Tucci (1997) enfatiza que os impactos decorrentes das cheias e inundações deveriam ser preferencialmente evitados com a adoção das medidas não estruturais. Nas áreas urbanas densamente ocupadas, no entanto, a desapropriação ou a transferência dos habitantes para outras localidades fora da zona de risco é questão complexa. Nesses casos, as medidas de manejo têm se baseado, principalmente, na adoção de programas de armazenamento e contenção de cheias, através da construção de barragens e reservatórios (PIRES e SANTOS, 1995).

É possível identificar uma linha evolutiva nas tecnologias e abordagens em drenagem urbana, partindo da adoção das medidas tradicionais e direcionando-se para novas alternativas de cunho mais sustentável (MIGUEZ *et al*, 2015). As técnicas compensatórias e a renaturalização dos rios e córregos são medidas de destaque nesse contexto, mas ainda de implantação restrita no Brasil. A solução ideal deve ser definida para cada caso, em função das características do rio, do benefício da redução das enchentes, bem como dos aspectos sociais de seu impacto. Para cada caso, uma combinação das medidas ainda pode ser viabilizada na questão da problemática das cheias (TUCCI, 1997).

Para avaliar o desempenho e eficácia dessas medidas, a implementação de modelos matemáticos para a elaboração de cenários preditivos e de informação avançada constitui uma abordagem consagrada na gestão de recursos hídricos (TUNDISI, 2006). Com aplicações irrestritas em diversas áreas, as simulações numéricas introduzidas em plataformas computacionais reproduzem a realidade de maneira satisfatória. Apesar das simplificações inerentes aos modelos, a modelagem computacional constitui uma importante ferramenta de subsídios aos gestores junto ao processo decisório (PESSANHA, 2012).

Outros 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 Christofolletti (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 (INEA, 2013).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho consiste em apresentar uma revisão sobre as cheias urbanas, suas atuais técnicas de gestão, convergindo para a bacia hidrográfica do rio Macaé, num estudo de caso. Nesse intento, a revisão bibliográfica é dividida em cinco grandes áreas principais: (i) Marco Legal da Gestão de Recursos Hídricos; (ii) Panorama das cheias urbanas no Brasil, partindo de uma perspectiva nacional e atingindo uma escala local centrada no município de Macaé; (iii) Técnicas de gestão das cheias urbanas; (iv) modelagem hidrológica e computacional aplicada ao estudo de cheias e inundações; e (v) Caracterização da bacia hidrográfica do rio Macaé, com enfoque nos eventos de cheias e inundações.

Marco legal da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil

O Direito brasileiro concede uma ampla tutela às águas, inclusive em nível constitucional, sendo a água um tema antigo na legislação brasileira. A Constituição Federal de 1988 estabelece que as águas são bens da União (BRASIL, 1988), sendo este um dos primeiros temas tratados pelo Direito. Quase dez anos após a promulgação da Constituição Federal, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), lei nº 9433, de 09 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), também conhecida como Lei das Águas.

A PNRH estabelece os fundamentos, objetivos, diretrizes gerais de ação e instrumentos que irão viabilizar a gestão dos recursos hídricos no país (BRASIL, 1997). Dentre um de seus principais fundamentos, A PNRH estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial para sua implementação e atuação do SNGRH (BRASIL, 1997). Outro fundamento da PNRH é o estabelecimento da gestão descentralizada dos recursos hídricos, que deve ser e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades, dispositivo que se relaciona diretamente com os Comitês de Bacia Hidrográfica (BRASIL, 1997).

Os comitês são organismos colegiados oriundos dos diversos setores usuários de água, das organizações da sociedade civil ou dos poderes públicos, e constituem um tipo de organização inteiramente nova na realidade institucional brasileira. Dentre os principais

instrumentos da PNRH, configuram os Planos de Recursos Hídricos, cuja aprovação constitui uma das principais competências dos Comitês. Os Planos de Recursos Hídricos, também conhecidos como Planos de Bacia, são planos diretores de longo prazo, com horizonte de planejamento compatível com o período de implantação de seus programas e projetos (BRASIL, 1997).

O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras

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 e de financiamento pela Petrobras. Vale destacar que o consórcio tratado aqui trata-se da junção de duas empresas, e não o antigo consórcio municipal 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), que será devidamente apresentada mais adiante.

Panorama das cheias urbanas: do Brasil à Macaé

As cheias urbanas constituem desastres naturais que afetam drasticamente a sociedade, trazendo consequências em número de mortes e desabrigados, além de prejuízos materiais. A fonte oficial de dados sobre a incidência de eventos críticos no Brasil é a Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC), vinculada ao Ministério de Integração Nacional (MI) (ANA, 2015). Segundo definições do referido órgão (CASTRO, 1998), os eventos de *cheias* referem-se a “ 1. *enchente de um rio causada por chuvas fortes ou fusão das neves*; 2. *elevação temporária e móvel do nível das águas de um rio ou lago*; 3. *inundação*”.

Os eventos de cheias podem ainda ser 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 escoar 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)

Segundo a última edição do Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (BRASIL, 2013), tais ocorrências ainda têm impacto significativo na sociedade brasileira, a exemplo do ano de 2012. Conforme aponta a tabela 1, de todos os eventos de desastre considerados no período, o somatório de alagamentos, enxurradas e inundações abrangem cerca de 44% do total de pessoas atingidas por desastres ambientais. O primeiro lugar no *ranking* é composto pelos eventos de seca/estiagem, que somam cerca de 50,85% do total das ocorrências.

Tabela 1. Distribuição de pessoas atingidas por desastres naturais no Brasil em 2012.

Eventos	Óbitos	Feridos	Enfermos	Desabrigados	Desalojados	Desaparecidos	Afetados	Percentual
Seca/Estiagem	6	0	14.214	30	750	0	8.956.853	50,85%
Incêndio florestal	0	0	0	0	0	0	37.338	0,21%
Movimentos de massa	26	10	2	1129	2801	0	123.555	0,72%
Erosão	0	0	5	81	2105	0	55.653	0,33%
Alagamentos	5	6	6	1.048	954	0	24.581	0,15%
Enxurradas	26	6.580	14.318	49.769	26.2851	2	1.856.359	12,41%
Inundações	14	2.409	10.665	52.041	21.6349	2	5.185.018	30,98%
Geadas	0	0	0	0	0	0	30.777	0,17%
Granizo	0	11	4	418	7.971	1.040	103.265	0,64%
Tornados	0	2	0	1	20	0	4.310	0,02%
Vendaval	16	150	13	5.769	13.220	0	599.905	3,51%
TOTAL	93	9.168	39.227	110.286	507.021	1.044	16977614	100%

Fonte: Adaptado de anuário de Desastres Naturais, 2012

Considerando as macrorregiões, muitos desastres naturais envolvendo eventos de cheias tiveram ocorrência na região sudeste nos últimos séculos. No estado do Rio de Janeiro, mais especificamente, de acordo com um levantamento realizado pelo Corpo de Bombeiros, foram registradas 23 ocorrências marcantes num período de 300 anos (1711 a 2011). Nessa série histórica, há destaque para a enchente de 1987, que afetou os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Rio de Janeiro, totalizando 292 mortos, 20.000 desabrigados e fazendo a cidade do Rio decretar estado de calamidade pública (CBRJ, 2016).

Outro episódio marcante ocorreu na região serrana em 2011, com mais de mil mortos e considerado o maior desastre natural da história do Brasil (CBRJ, 2016). O “Megadesastre” deixou mais de 45.000 desabrigados e desalojados, consolidando, infelizmente, a Serra Fluminense como a região brasileira com o maior quantitativo de vítimas fatais provocadas por desastres naturais (40% do total nacional entre 1988 e 2012) (BRASIL, 2012). O município de Nova Friburgo teve o maior número de vítimas: 389; seguido de Teresópolis, com 324; Petrópolis, com 65; e mais de 30 mortos em Sumidouro, São José do Vale do Rio Preto e Bom Jardim (SANTOS, 2011).

De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, o estado do Rio de Janeiro possui 56 registros oficiais de alagamentos excepcionais caracterizados como desastre, contabilizados entre os anos de 1991 e 2012. Nesse estudo, Macaé registrou oito ocorrências

de alagamentos no período: três no ano 2007, três no ano 2008 e mais duas no ano 2009. Quatro dessas oito ocorrências foram consideradas dentre os eventos humanos mais severos no período, conforme mostra a tabela 2. Destaca-se que um dos eventos de 2007, Macaé aparece com 143.117 pessoas afetadas de um total de 206.728 habitantes, o que representa cerca de 70% da população do município, pelo CENSO de 2010 (BRASIL, 2013).

Tabela 2. Distribuição de pessoas atingidas por eventos mais severos

Ano	Município	Mesorregião	Desabrigados	Desalojados	Afetados
2007	Belford Roxo	Metropolitana do Rio de Janeiro	384	2317	181.300
2007	Macaé	Norte Fluminense	-	104	143.117
2008	Macaé	Norte Fluminense	14	8	105.000
2007	Macaé	Norte Fluminense	5	161	85.268
2009	Macaé	Norte Fluminense	-	10	75.000
2008	Belford Roxo	Metropolitana do Rio de Janeiro	-	-	30.000
2010	Petrópolis	Metropolitana do Rio de Janeiro	-	-	30.000
2006	Belford Roxo	Metropolitana do Rio de Janeiro	7	13	27.000
TOTAL			410	2.613	676.685

Fonte: Adaptado de Atlas Brasileiro de Desastres Naturais
CEPED UFSC, 2013

De acordo com outro 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).

Cheias urbanas: motivadores, abordagens e técnicas de mitigação

A urbanização constitui uma das ações antrópicas que mais resultam em impactos ambientais, justamente pela alteração das características originais do solo. O rápido crescimento das cidades, principalmente de maneira desordenada, agravou os problemas das cheias urbanas, já que o desenvolvimento urbano tende a suprimir a cobertura vegetal original, aumentando a impermeabilização, introduzindo obras e intervenções de canalização e ocupando as planícies ribeirinhas (MIGUEZ *et al*, 2015).

Tucci (1997) destaca que as enchentes em áreas urbanas ocorrem basicamente devido a dois processos, isoladamente ou de forma integrada:

- **Enchentes devido à urbanização:** são o aumento da frequência e magnitude das enchentes devido a ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. Adicionalmente o desenvolvimento urbano pode produzir obstruções ao escoamento como aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento;
- **Enchentes em áreas ribeirinhas** - as enchentes naturais que atingem a população que ocupa o leito maior dos rios. Essas enchentes ocorrem, principalmente pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos extremos, em média com tempo de retorno da ordem de 2 anos.

(TUCCI, 1997)

Tais processos geram impactos que alteram profundamente o balanço hídrico, traduzindo-se em aumento das vazões de pico (figura 2). 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).

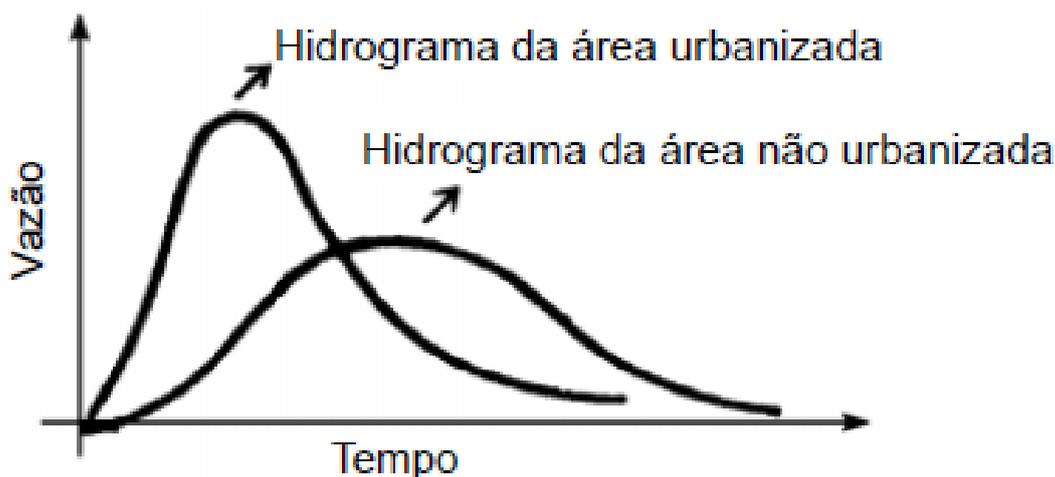


Figura 2. Hidrograma de uma área urbanizada e não urbanizada

Fonte: TUCCI, 1995

O sistema tradicional de drenagem urbana é composto pelos sistemas de micro e de macrodrenagem. A microdrenagem urbana é definida pelo sistema de condutos pluviais a nível de loteamento ou de rede primária urbana. Engloba o pavimento de ruas, guias e sarjetas, bocas de lobo, rede de galerias de águas pluviais e, também, canais de pequenas dimensões. É dimensionado para o escoamento de vazões de 2 a 10 anos de período de retorno². A macrodrenagem destina-se ao deslocamento final das águas captadas pela drenagem primária, conduzindo as parcelas de escoamento provenientes dos lotes e das ruas. É constituído, em geral, por canais abertos ou de contorno fechado de maiores dimensões, projetados para vazões de 25 a 100 anos de período de retorno (SÃO PAULO, 1998; NUCASE, 2007).

² O período ou tempo de retorno (TR) é o inverso da probabilidade p de um evento hidrológico ser igualado ou superado em um ano qualquer (TOMINAGA, 2013).

Considerando as duas grandes causas de enchentes supracitadas, de modo geral, a filosofia de controle de enchentes constitui: (I) para a macrodrenagem urbana: reservar espaço urbano para parques laterais ou lineares nos rios que formam a macrodrenagem para amortecimento das enchentes e retenção dos sedimentos e lixo; (II) para as áreas ribeirinhas: zoneamento de áreas de inundação, definindo-se zonas de alto e baixo risco de ocupação, e critérios de construção no código de obras da cidade (NUCAGE, 2007).

Projetos de drenagem adequados e integrados às características e limitações da própria bacia hidrográfica são, portanto, fundamentais no equacionamento do problema das cheias. Diferentes abordagens foram concebidas na comunidade científica, de acordo com as necessidades mais prementes de cada época. É possível identificar uma linha evolutiva, que vai desde uma concepção higienista, usualmente identificada com as práticas tradicionais, até as práticas mais atuais de manejo sustentável de águas urbanas e o projeto de cidades (MIGUEZ *et al.*, 2015).

O estado da arte do gerenciamento dos recursos hídricos contempla, fundamentalmente, dois enfoques distintos para o controle da quantidade das águas do escoamento superficial direto em áreas urbanas: o enfoque orientado para o *aumento da condutividade hidráulica*; e o enfoque orientado para o *armazenamento das águas*. Destaca-se que estas duas formas de abordagem não são mutuamente excludentes. Dentro desse enfoque estão inseridas tantas as práticas tradicionais, geralmente mais voltadas ao aumento da condutividade; quanto as práticas consideradas de manejo sustentável, mais voltadas ao enfoque de armazenamento e infiltração (SÃO PAULO, 1998).

A concepção predominante em drenagem urbana no Brasil ainda é a baseada no “sistema clássico”. Tais preceitos preconizam a condução das águas pluviais por meio da implantação de condutos, preferencialmente subterrâneos, afastando a água do homem, tradicionalmente reconhecida como meio proliferador de vetores de inúmeras doenças (NUCAGE, 2007). Há valorização das grandes intervenções ao meio natural, estimulando obras como a canalização de corpos d’água e resultando no aumento das velocidades de escoamento das águas pluviais (BAPTISTA *et al.*, 2011).

O sistema clássico é tradicionalmente dividido na literatura por um conjunto de medidas estruturais e não-estruturais. De maneira geral, as medidas estruturais constituem em obras de engenharia que podem ser (i) extensivas, quando agem na bacia, procurando modificar as relações entre precipitação e vazão; ou (ii) intensivas, agindo diretamente no rio, acelerando, retardando ou desviando o escoamento (TUCCI, 1993). O autor relembra que é ingenuidade do homem imaginar que poderá controlar totalmente as inundações; as medidas visam minimizar as consequências. Nesse sentido, a própria expressão “controle de cheias” tem sido gradualmente substituída por “gestão de cheias” pelos especialistas, um indicativo do reconhecimento dos limites da capacidade humana frente ao controle do fenômeno em questão. Uma síntese explicativa dessas principais técnicas é apresentada no quadro 2.

Já as medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes. São elas: (i) a regulamentação do uso da terra ou zoneamento de áreas inundáveis, em consonância com o Plano Diretor da cidade; (ii) a construção à prova de enchente, conjunto de medidas para reduzir a perda de edificações localizados nas várzeas de inundação; (iii) 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, 1993).

A concepção tradicional, no entanto, vem aos poucos sendo complementada. Dentre as novas técnicas desenvolvidas, as chamadas Técnicas 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). Nessa concepção, fenômenos como o armazenamento, infiltração e utilização das águas pluviais nos próprios

lotes são privilegiados, por meio de formas de pavimentação permeável (MMA, 2016). Algumas medidas dentro dessa concepção podem ser visualizadas no quadro 3.

Medidas estruturais	Características	Principal vantagem	Principal desvantagem	Aplicação
Extensivas				
Controle da cobertura vegetal (reflorestamento)	Interfere no processo precipitação-vazão, reduzindo as vazões máximas. Contribui reduzindo a erosão do solo, que gradualmente aumenta o nível dos rios e agrava as inundações.	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas, devido aos custos	Pequenas bacias
Intensivas				
Diques ou polders	São muros laterais de terra ou concreto, inclinados ou retos, construídos a certa distância das margens, cuja função é proteger as áreas ribeirinhas contra o extravasamento.	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhem	Grandes rios
Modificações do rio (dragagens, corte de meandros, aprofundamento do rio)	São obtidas pelo aumento da seção transversal ou pelo aumento da velocidade do rio. As intervenções mais comuns são: dragagem, aumento da declividade, corte de meandros e aprofundamento do rio.	Aumento da vazão, ampliação da área protegida	Efeito localizado (desobstrução); Impacto negativo em rio com fundo aluvionar (corte de meandro)	Pequenos rios (desobstrução); área de inundação estreita (corte de meandro)
Reservatórios	Retém parte do volume da enchente, reduzindo a vazão natural. O volume retido no período das vazões altas é escoado após a redução da vazão natural.	Controle a jusante	Localização difícil, altos custos de construção e desapropriações	Bacias intermediárias

Quadro 2. Quadro síntese das medidas estruturais para gestão de cheias

Fonte: Adaptado de TUCCI, 1993

O efeito dessas medidas tem sido alvo de alguns estudos no Brasil, com destaque para os municípios do estado de São Paulo. 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 (TOMINAGA, 2013).

Outra medida para gestão de cheias que tem destaque na literatura, principalmente internacional, é a *renaturalização* de rios e córregos. Experiências realizadas na Europa, especialmente na Alemanha, demonstram que a recomposição de rios é viável mesmo com as restrições impostas no meio rural e urbano (BINDER, 1998). Ainda de acordo com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio de Janeiro, e considerando

Medidas Compensatórias	Vantagens	Desvantagens
Cisterna (para casas individuais ou grupo de casas)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Água pode ser utilizada para: <ol style="list-style-type: none"> a) proteção contra fogo b) rega de terras c) processos industriais d) refrigeração 2. Reduz o deflúvio superficial direto, ocupando pequenas áreas 3. O terreno ou espaço, acima da cisterna, pode ser usado para outros fins 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Custos relativamente altos de instalação 2. Custo requerido pode ser restritivo, se a cisterna receber água de grandes áreas de drenagem 3. Requer manutenção 4. Acesso restritivo 5. Reduz o espaço disponível do subsolo para outros fins
Jardim suspenso	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esteticamente agradável 2. Redução do deflúvio superficial direto 3. Redução dos níveis de ruído / calor 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elevadas cargas nas estruturas de cobertura e construção 2. Caro de instalar e manter
Armazenamento em telhado , empregando tubos condutores verticais estreitos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retardo de deflúvio superficial direto 2. Efeito de isolamento térmico do edifício: <ol style="list-style-type: none"> a) água no telhado b) através de circulação 3. Pode facilitar o combate a incêndios 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Carga estrutural elevada 2. A tomada d'água dos tubos condutores requer manutenção 3. Formação de ondas e cargas devido às mesmas 4. Infiltração da água do telhado para o edifício
Telhado com rugosidade aumentada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retardamento do deflúvio superficial direto e alguma redução do mesmo (detenção nas ondulações ou no cascalho) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Carga estrutural relativamente elevada
Pavimento permeável (estacionamento e vielas)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Redução do deflúvio superficial direto 2. Recarga do lençol freático 3. Pavimento de cascalho pode ser mais barato que asfalto ou concreto 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Entupimento dos furos ou poros 2. Compactação da terra abaixo do pavimento ou diminuição da permeabilidade do solo devido ao cascalho 3. Dificuldade de manutenção 4. Gramas e ervas daninhas podem crescer no pavimento

Quadro 3 Alguns exemplos de medidas compensatórias, suas vantagens e desvantagens

Fonte: Adaptado de SÃO PAULO, 1998

as linhas básicas de renaturalização de rios na Europa, a renaturalização tem duas funções fundamentais:

1. Recuperar os rios e córregos de modo a regenerar o mais próximo possível a biota natural, através de manejo regular ou de programas de renaturalização;

2. Preservar as áreas naturais de inundação e impedir quaisquer usos que inviabilizem tal função.

(BINDER, 1998)

Uma das metodologias para a renaturalização consiste em fazer a retirada os muros de contenção das margens, e proceder ao acompanhamento do rio, enquanto o mesmo recomeça a formar pequenos meandros na baixada. O monitoramento é crucial durante toda essa fase, devido aos riscos de alagamento das regiões ribeirinhas. Muitas áreas naturais de inundação podem ser transformadas em parques municipais (BINDER, 1998). Tucci (1997) ressalta, no entanto, que nenhuma área desapropriada pelo poder público deve ficar sem implantação de infraestrutura pública, parque ou área esportiva; sob risco de estar sujeita a invasões.

A renaturalização tem sido estudada no estado do Rio de Janeiro, no entanto os trabalhos ainda são escassos. Um estudo dos efeitos da medida no regime hídrico do Baixo Curso do Rio São João, sugere que a renaturalização ocorra em diversas etapas. A primeira consiste na limpeza e dragagem da porção assoreada e a construção de uma barragem no km 20 do estudo, que pela baixa energia da região, não precisaria ser rígida, concretada. A barragem poderia em seguida ser fixada com vegetação com as mesmas características da mata ciliar. São sugeridos programas de monitoramento, incluindo aspectos como hidrologia, evolução da calha no leito (BENIGNO *et al.*, 2003).

A construção de um modelo numérico determinístico³ também está sendo considerado no estudo, a partir da área da bacia de drenagem (a jusante da barragem), que contemplará: (i) o escoamento da água pelos diferentes tipos de solo constituintes da região; e (ii) a vazão gerada em cada trecho do rio. Além disso, comunidade e os agricultores locais devem ser mantidos constantemente informados em relação aos resultados do estudo, de maneira que possam colocar suas dúvidas e estas possam ser respondidas em termos de redirecionamento da pesquisa (BENIGNO *et al.*, 2003). O estudo, embora ainda preliminar, pode ser considerado um grande avanço em práticas de gestão dos recursos hídricos no estado do Rio de Janeiro, frente à adoção das tradicionais técnicas em drenagem urbana.

Modelagem aplicada ao estudo de cheias e inundações

Os modelos hidrológicos e hidráulicos constituem ferramentas essenciais para a gestão de bacias hidrográficas, bem como no planejamento de ações para mitigar os impactos das inundações. Os modelos hidrológicos têm como função a geração dos hidrogramas de cheia, que representa o escoamento resultante de uma precipitação. Alguns desses modelos são também descritos na literatura como *chuva-vazão*. Os hidrogramas de cheias gerados pelos modelos hidrológicos são utilizados como dados de entrada em modelos hidrodinâmicos, capazes de calcular níveis e vazões dos cursos d'água. Os modelos atuais integram os processos dos modelos hidrológicos e hidráulicos em apenas uma ferramenta e muitas vezes estão também associados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (TOMINAGA, 2013).

A modelagem da bacia hidrográfica e da rede de drenagem tem papel importante no gerenciamento da drenagem urbana, pois possibilita avaliar cenários e proceder o seu planejamento. O processo de aplicação do modelo hidrológico ou hidráulico para se obter a resposta da bacia hidrográfica e da rede de macrodrenagem em decorrência de um conjunto de variáveis de entrada é chamado simulação hidráulico-hidrológica. A simulação de modelos

³ Modelos determinísticos são aqueles em que os conceitos de probabilidade não são considerados durante sua elaboração, de finalidade adequada para fins de manejo (PESSANHA *et al.*, 2012).

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

As etapas de modelagem e simulação hidráulico-hidrológica podem ser estruturadas da seguinte forma:

1. Escolha dos modelos e determinação dos parâmetros e variáveis de entrada necessários à modelagem;
2. Escolha do *software* e preparação/inserção dos dados de entrada;
3. Simulação
4. Calibração dos parâmetros dos modelos
5. Interpretação dos resultados

(CANHOLI, 2014)

No mercado existem disponíveis diversos pacotes de *softwares* para a simulação de modelos hidrológicos e hidráulicos. Os tópicos a seguir farão uma breve exposição de alguns desses modelos, com destaque para o MOHID *Land*.

HEC-HMS e HEC-RAS

A plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*), desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*) 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 (HEC US 2016). O módulo HEC-HMS (*Hydrologic 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).

SWMM

A plataforma SWMM (*Storm Water Management Model*) é um *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).

MOHID Land

O MOHID é um sistema de modelagem numérica tridimensional desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) no Centro de Estudos MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Portugal, em cooperação com a empresa Hidromod Ltda (MOHID, 2016). O sistema de modelagem do MOHID permite a adoção de uma filosofia de modelagem integrada, não apenas de processos (físicos e bioquímicos), mas também diferentes escalas (permitindo o uso de modelos em rede) e sistemas (estuarinos de bacias hidrográficas), devido à adoção de uma filosofia de programação objeto-orientada (MOHID, 2006).

A filosofia do novo modelo MOHID permite a utilização em suas abordagens uni, bi e tridimensional. A subdivisão do programa em módulos, assim como o fluxo de informações entre esses módulos, foi objeto de estudo por parte dos autores do MOHID por muitos anos. Atualmente, o MOHID é composto por mais de 40 módulos, os quais somam mais de 150.000 linhas de programação. Cada módulo é responsável por gerenciar um certo tipo de informação, conferindo maior realismo e especificidade ao modelo (JULIANO *et al*, 2012).

O MOHID Land é um modelo distribuído espacialmente para as propriedades das bacias hidrográficas e ciclo de águas interiores. O MOHID Land lida com processos específicos da bacia hidrográfica, tais como: escoamento superficial, infiltração e rede de drenagem (Wiki MOHID, 2015) razão pelo qual foi selecionado neste trabalho. Possui vínculo com o MOHID Water pelo módulo descargas, permitindo a gestão da bacia e a simulação de inundações (MOHID, 2006). O software tem sido utilizado em estudos de cheias urbanas, permitindo o desenvolvimento de um Sistema Integrado de Simulação de cheias, no Estuário do Espírito Santo (Baía de Maputo, Moçambique) (MALHADAS, *et al*, 2012).

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 (Eq. (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 (Eq. (2)). Já o escoamento superficial faz uso de uma abordagem tridimensional, sendo regido pela equação de Richard (Eq. (3)) (TELLES *et al*, 2013 *apud* Braunschweig *et al.*, 2010). O conjunto completo de equações adotada no MOHID Land (figura 3) são:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_h^{4/3}} \right) \quad (1)$$

$$Q = \frac{AR_h^{2/3} \sqrt{\partial h / \partial x}}{n} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} K(\psi) \left[\frac{\partial \psi}{\partial X} + \frac{\partial z}{\partial X} \right] \quad (3)$$

(TELLES *et al*, 2013)

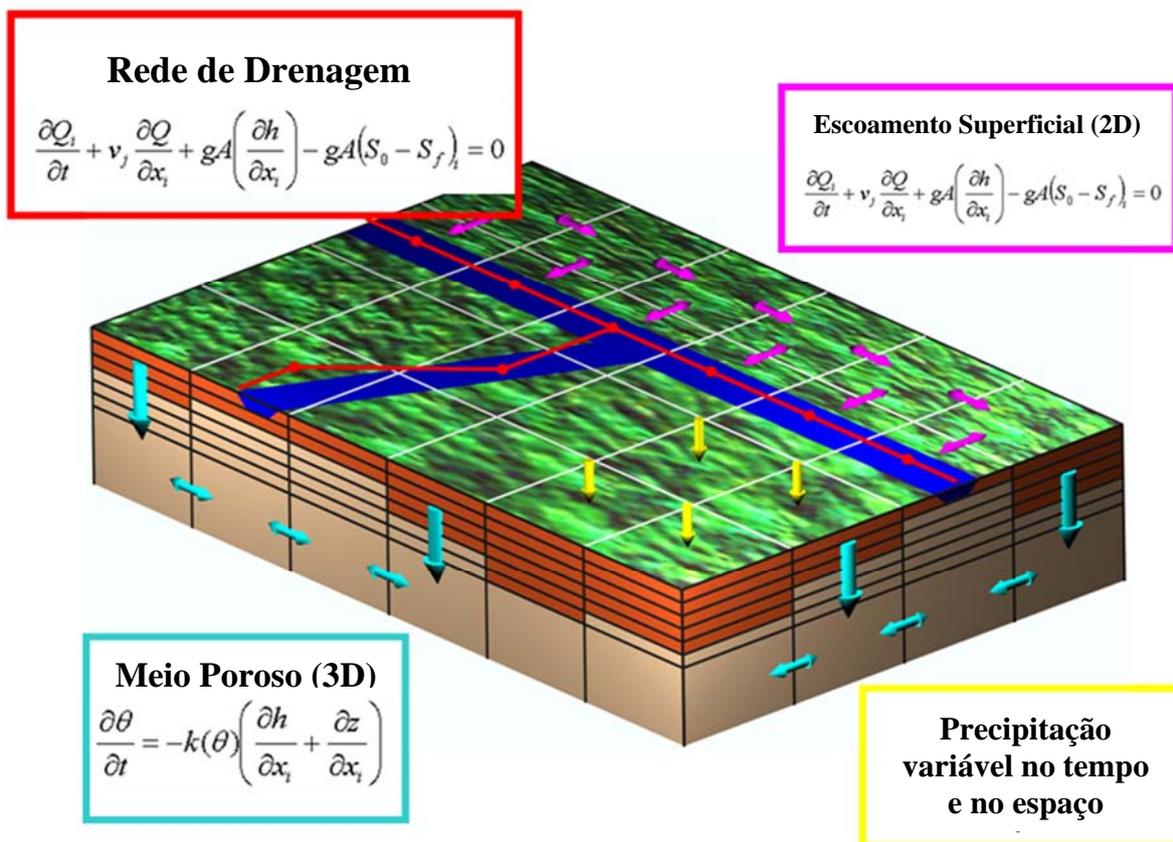


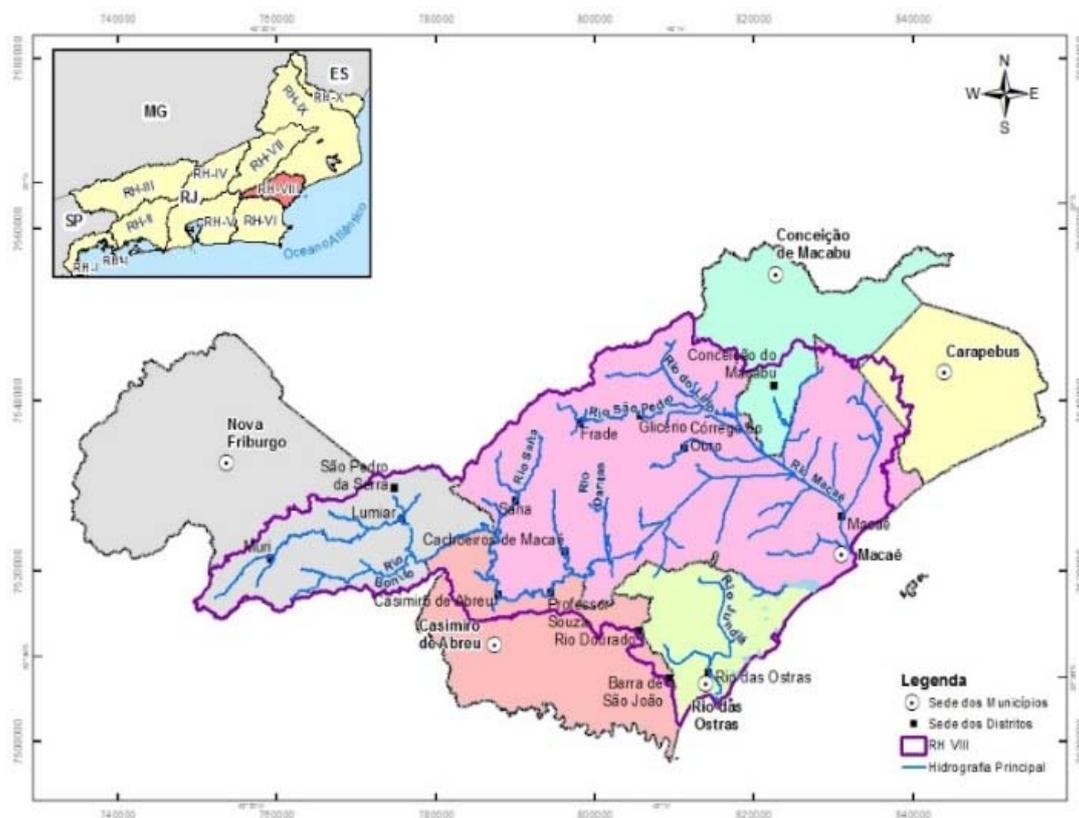
Figura 3. Sistema de equações regidas pelo MOHID *Land*.

Fonte: MOHID.com

Em que $Q(x, t)$ é o canal de descarga; x e t são as variáveis de espaço e tempo, respectivamente; $A(x, t)$ é a área de corte transversal; g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s); $h(x, t)$ é a profundidade de circulação; $n(x)$ é o coeficiente rugosidade, $R(x, t)$ é o raio hidráulico; θ é a unidade de solo; z é a coordenada vertical, na direção positiva de baixo para cima; \rightarrow - o símbolo X representa o vetor contendo a variável de posição X, Y e Z , ψ é a pressão hidrostática e $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica (TELLES *et al*, 2013).

Bacia Hidrográfica do Rio Macaé no contexto das cheias e inundações

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 (Mapa 1). 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).



Mapa 1. Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII)

Fonte: Plano de Bacia Macaé / Ostras

O conceito de bacia hidrográfica tem sido amplamente discutido na literatura por diversos autores. Segundo Tucci (1993):

A bacia hidrográfica é a área total de superfície de terreno de captação natural da água precipitada, na qual um aquífero ou um sistema fluvial recolhe sua água.

Conforme Coelho Neto (1998), a bacia hidrográfica constitui:

Uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial.

Amaral (2003) 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.

Podendo também ser definida como: “*toda a área da superfície terrestre onde ocorre o direcionamento das águas das chuvas para um rio e seus afluentes*” (IPGA, 2015).

Em suma, e na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de bacia hidrográfica envolve explicitamente o “*conjunto de terras drenadas por um corpo d’água principal e seus*

afluentas”. Representa, portanto, a unidade de gestão mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes. Do ponto de vista do planejador direcionado à conservação dos recursos naturais, o conceito envolve ainda o conhecimento (i) da estrutura biofísica da bacia; (ii) das mudanças nos padrões de uso da terra; e (iii) de suas implicações ambientais (PIRES *et al*, 2002).

O Rio Macaé nasce na Serra Macaé de Cima, em Nova Friburgo, desaguando no oceano Atlântico junto à cidade de Macaé (CBH, 2016). Além de seus diversos afluentes, contribuem ainda para a bacia do Rio Macaé a sub-bacia do Rio São Pedro (Mapa 2) e a transposição das águas da bacia do Rio Macabu. (IPGA, 2015). No final da década de 60, a Bacia do rio Macaé teve cerca de 60 km do canal principal retificado pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), além de trechos de afluentes como o do rio São Pedro. O processo trouxe diversos impactos como o assoreamento na porção terminal do rio Macaé, contribuindo à frequência e intensidade das cheias (IPGA, 2015; ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012).

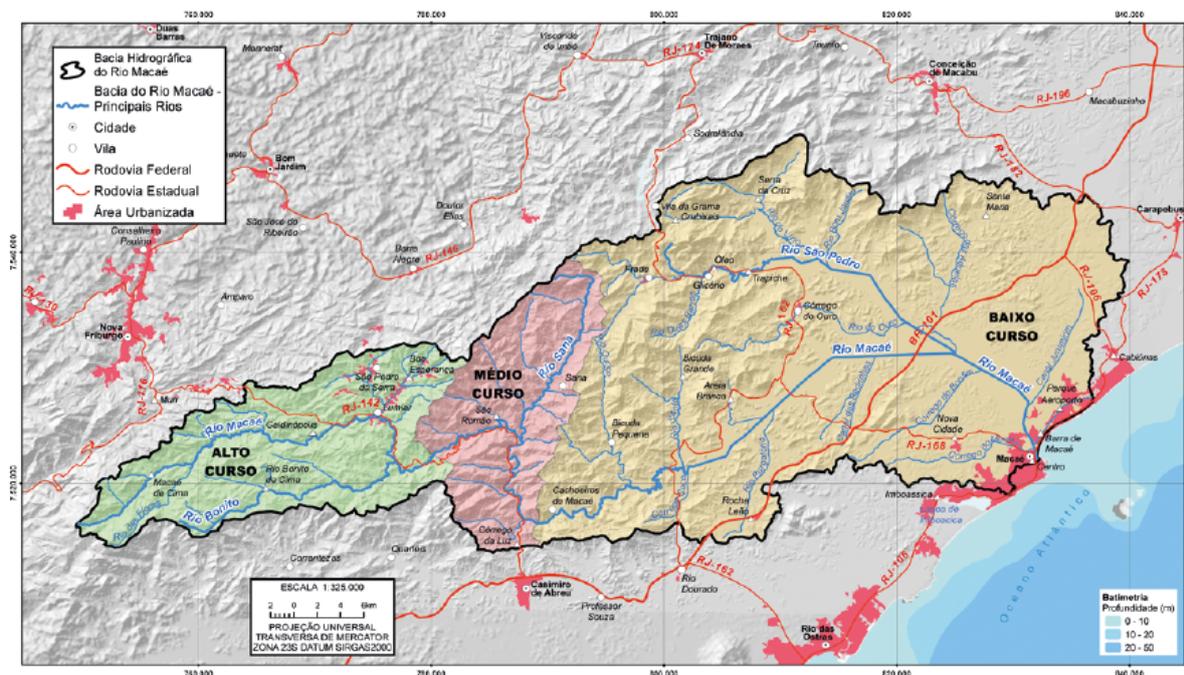


Mapa 2. Carta imagem da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé

Fonte: Atlas da Bacia Hidrográfica do rio Macaé

IPGA, 2015

O sistema hidrográfico do rio Macaé pode ser caracterizado como uma grande área de nascentes e canais erosivos que produzem e liberam eficientemente matéria e energia até os compartimentos mais baixos do relevo. Nesses, matéria e energia são processados com menor velocidade até os trechos retificados, onde há novamente um aumento da capacidade de transporte até a saída do sistema na cidade de Macaé (LIMA e MARÇAL, 2013). A bacia hidrográfica do rio Macaé pode ser compartimentada em zonas, sendo elas denominadas: superior, média e inferior. Essas regiões são intercortadas pelo alto, médio e baixo curso do rio Macaé (Mapa 3), respectivamente (IPGA, 2015).



Mapa 3. Mapa de Compartimentação da bacia hidrográfica do rio Macaé

Fonte: Atlas da Bacia Hidrográfica do rio Macaé

IPGA, 2015

A questão das cheias no rio Macaé é condicionada por diversos fatores. Segundo o Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé/Ostras (INEA, 2013), a diferença de altitude nos trechos superior e inferior da bacia hidrográfica do rio Macaé é um dos mais relevantes. A declividade do rio principal apresenta dois trechos distintos, divididos pelo Cachoeiro do Macaé, localizado cerca de 65 km a montante da foz. Na parte elevada da bacia, a declividade é da ordem de 10 m.km^{-1} ou mais. Já o segundo trecho apresenta baixa declividade (figura 4) (INEA, 2013).

A contribuição de um grande número de afluentes na região do alto curso também é condição que favorece significativamente a formação das cheias. O leito fluvial confinado ou parcialmente confinado também condiciona uma maior velocidade ao curso hídrico. Na zona inferior da bacia há redução da declividade do rio, com conseqüente diminuição da velocidade da água. Como conseqüência, nos períodos de chuva intensa ocorre a inundação das planícies fluviais, onde a onda de cheia é atenuada lateralmente, se espalhando por toda a planície fluvial, ao invés de seguir a jusante (INEA, 2013).

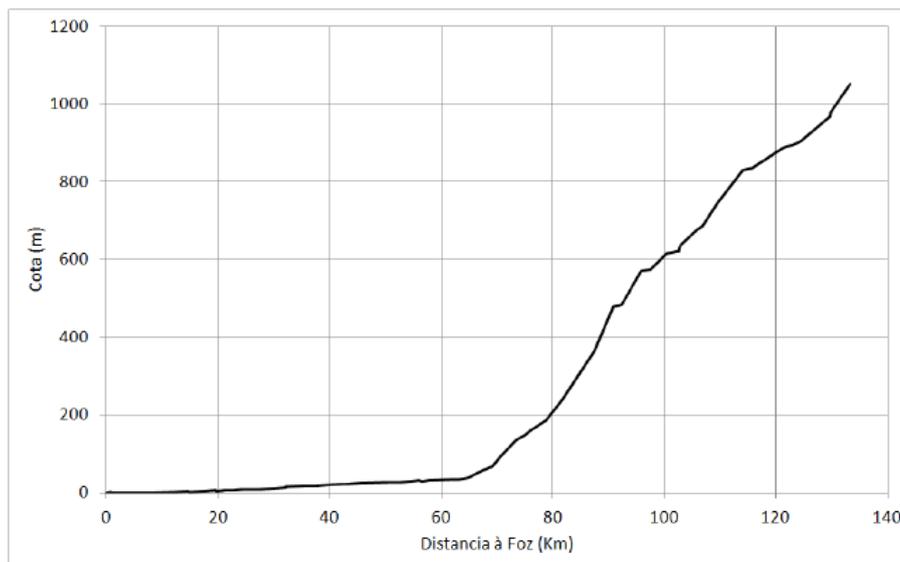


Figura 4. Perfil longitudinal do rio Macaé (partindo da foz até a proximidade das nascentes)

Fonte: Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades
Hídricas da Região Hidrográfica Macaé/Ostras
INEA, 2013

Um estudo de cheias foi realizado na região de Macaé pela FGV em 2004, identificando os principais problemas de enchentes na cidade e analisando algumas alternativas para o seu controle. Essas alternativas foram analisadas através de modelagem matemática, utilizando um modelo capaz de representar o escoamento no rio e o processo de inundação das planícies marginais. O modelo foi aplicado considerando o trecho do rio Macaé desde a Ponte do Baião até a foz, incluindo ainda um trecho do rio São Pedro, a montante da confluência deste com o rio Macaé. As alternativas consideradas foram:

1. Dragagem do leito no trecho final do rio;
2. Construção de diques em torno das áreas baixas habitadas, formando um polder;
3. Construção de uma barragem, com a formação de um reservatório de controle de cheias

(FGV, 2004).

Uma síntese desses resultados é apresentada a seguir: (i) as simulações realizadas indicaram que o efeito da dragagem neste trecho do rio é bastante localizado, mas poderia reduzir os níveis de cheia em cerca de 20 cm, junto a algumas regiões atingidas por cheias; (ii) a alternativa do polder Nova Malvinas não possui efeito direto sobre os níveis de cheia do rio Macaé; e (iii) o reservatório do controle de cheias não teria capacidade de atenuar as cheias oriundas de outros afluentes do rio Macaé, em especial as cheias do rio São Pedro, cuja confluência com o rio Macaé encontra-se a jusante do local proposto para a barragem. Por fim, como recomendação, propôs um estudo de implantação de uma barragem no rio São Pedro, para atuar em conjunto com a barragem do rio Macaé (FGV, 2004)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cheias urbanas configuram entre os cinco desastres naturais que mais afetam os brasileiros. A última edição do Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (BRASIL, 2012), revelou que em 2012, de todos os eventos de desastre considerados no período, o somatório de alagamentos, enxurradas e inundações abrangem cerca de 44% do total de pessoas atingidas por desastres ambientais. Os dados demonstram a relevância de um estudo de cheias para o país, e em especial para o estado do Rio de Janeiro, que de acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Ambientais, possui 56 registros oficiais de alagamentos excepcionais caracterizados como desastre, contabilizados entre os anos de 1991 e 2012.

O município de Macaé sofre frequentemente com o problema das cheias, com grande contingente de habitantes afetados. Em dois estudos oficiais, Macaé registrou pelo menos oito ocorrências de alagamentos no período de 1991 a 2012: três no ano 2007, três no ano 2008 e mais duas no ano 2009. Quatro dessas oito ocorrências foram consideradas dentre os eventos humanos mais severos no período, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013). Macaé aparece com 143.117 pessoas afetadas de um total de 206.728 habitantes na cheia de 2007, o que representa 70% da população do município, pelo CENSO de 2010.

Em relação as técnicas para gestão de cheias, há uma gradual mudança de paradigma nas abordagens e métodos em drenagem urbana. A pesquisa bibliográfica permitiu identificar uma linha evolutiva, que vai desde as práticas tradicionais, até as atuais práticas de manejo sustentável de águas urbanas e o projeto de cidades (MIGUEZ *et al*, 2015). Embora a concepção predominante em drenagem urbana no Brasil ainda seja baseada no “sistema clássico”, é notável a sua complementação por novas técnicas mais sustentáveis. Dentre as novas técnicas desenvolvidas, a pesquisa permitiu identificar duas linhas principais:

- As Técnicas Compensatórias, que 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).
- A Renaturalização de rios e córregos, que visa a recomposição dos rios, buscando restabelecer seu estado natural e suas áreas naturais de inundação (BINDER, 1998).

O efeito dessas medidas tem sido alvo de alguns estudos no Brasil, aliados ao uso da modelagem computacional para avaliação de sua eficácia. Em relação às medidas compensatórias, Tominaga (2013) analisou o efeito de amortecimento do pico de cheias pela implantação de medidas compensatórias, através do modelo SWMM. O amortecimento do pico de cheia foi verificado em todos os 209 cenários analisados (TOMINAGA, 2013). Em relação à renaturalização, um estudo preliminar de seus efeitos no regime hídrico do Baixo Curso do Rio São João (2003) considera a construção de um modelo numérico determinístico, que contemplará: (i) o escoamento da água pelos diferentes tipos de solo constituintes da região; e (ii) a vazão gerada em cada trecho do rio (BENIGNO *et al*, 2003).

Em Macaé, o principal estudo de cheias já realizado considerou o efeito de três medidas estruturais: (i) realização de uma dragagem do leito no trecho final do rio; (ii) construção de diques em torno das áreas baixas habitadas, formando um polder; e (iii) construção de uma barragem, com a formação de um reservatório de controle de cheias (FGV, 2004).

Considerando as limitações dessas técnicas previstas nos resultados, e o atual estado da arte em drenagem urbana, conclui-se que novos estudos de cheias centrados em Macaé devem avaliar os efeitos das novas práticas sob a cheia no município. Dentre essas práticas, têm destaque a Renaturalização e as Técnicas Compensatórias, que podem ainda ser utilizadas de maneira integrada entre si e com as demais técnicas já implementadas do sistema de drenagem urbana tradicional, bem como ser simuladas e avaliadas por meio da modelagem computacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cheias urbanas constituem um dos desastres naturais de maior abrangência e severidade no país, o que justifica e valoriza o presente estudo. O estado do Rio de Janeiro possui 56 registros oficiais de alagamentos excepcionais caracterizados como desastre, contabilizados entre os anos de 1991 e 2012. O município de Macaé apresenta registro de cheias recorrente e com grande número de habitantes envolvidos, sendo apresentado em posição de destaque no estado, evidenciado em trabalhos de nível nacional e estadual.

A literatura centrada na mitigação e gestão de cheias urbanas é vasta e segue abordagens distintas. Atualmente as correntes tradicionais estão sendo complementadas por técnicas de visão sistêmica, que visam o reestabelecimento do ciclo hidrológico prévio à urbanização. Embora a concepção predominante em drenagem urbana no Brasil ainda seja baseada no “sistema clássico”, é notável a sua complementação por novas técnicas mais sustentáveis. Embora de implementação considerada ainda incipiente no país, o efeito dessas medidas tem sido alvo de alguns estudos no Brasil, aliados ao uso da modelagem computacional para avaliação de sua eficácia.

Os trabalhos centrados no controle de cheias e propostas de mitigação para a região de Macaé, no entanto, são escassos e destoam das atuais práticas evidenciadas na literatura. Futuros estudos de cheias centrados na região devem avaliar os efeitos das novas práticas em drenagem urbana sob a cheia no município de Macaé. Dentre essas práticas, têm destaque a Renaturalização e as Técnicas Compensatórias, que podem ainda, ser utilizadas de maneira integrada entre si e com as demais técnicas já implementadas do sistema de drenagem urbana tradicional, bem como ser simuladas e avaliadas por meio da modelagem computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 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**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2003.

ASSUMPÇÃO, A. P.; MARÇAL, M. S. **Retificação dos canais fluviais e mudanças geomorfológicas na planície do Rio Macaé**. Revista de Geografia UFPE, V. 29, No. 3, 2012.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. ABRH. 2ª 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.

BARRETO, Guilherme Sardenberg. **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.

BENIGNO, E.; SAUNDERS, C.; WASSERMAN, J. C. **Estudo dos Efeitos da Renaturalização no Regime Hídrico do Baixo Curso do Rio São João**. Departamento de Análise Geoambiental e PGCA - UFF. Niterói, 2003.

BINDER, W. **Rios e Córregos: Preservar - Conservar - Renaturalizar**. SEMADS, Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais**. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres - CENAD. Brasília, 2012.

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

BRASIL. **Constituição Federal Brasileira**, Brasília, 1988.

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

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

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

CASTRO, A. L. C. **Glossário de Defesa Civil, Estudos de Riscos e Medicina de Desastres**. 2ª ed. Brasília, 1998.

CEPED UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais de 1991 a 2012**. 2ª edição revista e ampliada, 2013.

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

COELHO NETO, A. L. **Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia** p 93-148. *In: Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3 ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 1998.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - CBRJ. **Histórico do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro**. Disponível em: <<http://www.cbmerj.rj.gov.br/index.php/component/content/article?id=20:resumo-historico>> Acesso em: 20 jun 2016.

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

FOLHA. “Macaé tem 15 mil ilhados pela enchente”. Portal Folha de São Paulo. 1998. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff20029842.htm>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da; **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3 ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 1998

GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da; **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2001.

HEC - HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. **HEC RAS**. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>> Acesso em: 01 ago 2016.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>> Acesso em 8 nov. 2015.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO URBANO E GESTÃO AMBIENTAL (IPGA). **Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé**. 1a ed. Rio de Janeiro: Editora Nova Tríade do Brasil Ltda, 2015.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE - INEA - MACAÉ E DAS OSTRAS. **Plano de Trabalho Consolidado (RPT) Versão Revisada. Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras**, 2011.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE - INEA. **Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras**, 2013.

JULIANO, Maria Manuela Fraga *et al.* **Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos – RJ**. Boletim do

Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 6 n. 1, p. 161-172, jan. / jun, 2012.

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, nº 2, 2013.

MALHADAS, M.S.; LEITÃO P.C.; RIBEIRO J.; SILVA A.; LEITÃO P.; COTA T.; **Sistema integrado de simulação de cheias no Estuário do Espírito Santo (Baía de Maputo, Moçambique)**, (1) HIDROMOD, (2) IST-Maretec, 2012.

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

MILLAR, Agustin, A. **O gerenciamento de recursos hídricos e o mercado das águas**. Brasília, Secretaria de Irrigação, 1994.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Controle de Inundações**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/aguas-urbanas/control-de-inunda%C3%A7%C3%B5es>> Acesso em: 20 jul 2016.

MOHID WIKI. **MOHID Land**. Disponível em: <wiki.mohid.com/wiki/index.php?title=Mohid_Land> Acesso em: 20 nov 2015.

MOHID. Disponível em: < http://www.mohid.com/lagrangian_module.htm> Acesso em: 10 nov. 2015.

MOHID. **Modelling Water Resources**. Disponível em: <<http://www.mohid.com/>> Acesso em: 20 jul 2016.

Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental - NUCASE. **Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas: guia do profissional em treinamento: nível 2 e 3**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte, 2007.

O DEBATE ON. “Chuvas deixam Macaé em estado de alerta máximo nos próximos dias”. 2001. Disponível em: < <http://odebateon.com.br/site/noticia/impresao/15547/chuvas-deixam-macaee-em-estado-de-alerta-maximo-nos-proximos-dias>> Acesso em: 19 jul. 2016.

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

PESSANHA, Cassius Marcelo Dutra. **Modelagem computacional aplicada à gestão sanitário-ambiental da lagoa imboassica-RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental modalidade profissional) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2012.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E.; **A Utilização do Conceito de Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais**. [in] SCHIAVETTI, A.;

CAMARGO, A. F. M.; **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilhéus, Ba. Ed. Editus, 2002.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J.E. **Bacias Hidrográficas: integração entre meio ambiente e desenvolvimento**. Ciência Hoje 19(110): 40-45. Christofolletti, A. Geomorfologia. 2ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1995.

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

RIO DE JANEIRO. DECRETO Nº 34.243. **Institui o comitê da bacia hidrográfica do Rio Macaé**. 2003.

SANTOS,R. **O Colapso da Gestão de Risco nas cidades brasileiras**. 2011.

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

TCE RJ, 2012, **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.

TELLES, W. R.; NETO, SILVA NETO, A. J.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Modeling the Flow of a River SISBAHIA. SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>> Acesso em: 20 jul 2016.

Using the MOHID Plataforma 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) November 3-7, Ribeirão Preto, 2013.

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

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. In: Carlos E. M. Tucci; Rubem La Laina Porto; Mário T. de Barros. (Org.). **Drenagem Urbana**. Drenagem Urbana. 1ed. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS) - ABRH Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1, p. 15-36, 1995.

TUCCI, Carlos E. M. **Água doce**. 1997 Disponível em: <http://www.pec.poli.br/sistema/material_disciplina/fotos/%C3%A1guanomeio%20urbano.pdf> Acesso em: 18 jun. 2016.

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez**. Rima, São Carlos, 2003.

TUNDISI, J. G. **Novas perspectivas para a Gestão de Recursos Hídricos**. REVISTA USP, São Paulo, n.70, p. 24-35, junho/agosto 2006.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o *MOHID Land*⁴

RESUMO

Os eventos de cheias urbanas se destacam como um dos desastres naturais de maior abrangência no país (BRASIL, 2012), com efeitos locais recorrentes nas médias e grandes cidades. A utilização de modelos computacionais de variada complexidade auxilia a compreensão da dinâmica hidrológica dos corpos hídricos em análise, além de permitir a simulação de cenários de interesse (HORA et al., 2011; PESSANHA, 2012). Nessa perspectiva, o objetivo do trabalho foi construir um modelo hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Macaé (RH-VIII) utilizando o *MOHID Land* e realizando a simulação de cenários voltados ao controle das cheias na região urbana de Macaé. Os cenários simulados compreenderam: *i.* barramento localizado a montante da Ponte do Baião (Bicuda Pequena, Macaé); e *ii.* aumento do Coeficiente de Manning no canal (de 0,035 para 0,08). Os resultados indicam que as vazões máximas obtidas foram compatíveis com estudos anteriores (BARBOZA (2014); Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013)). A análise dos hidrogramas de cheia ($m^3 \cdot s^{-1}$) indica que, dentre as intervenções simuladas, o aumento do coeficiente de rugosidade (n) nos trechos retelinizados obteve os maiores efeitos na atenuação dos picos de cheia no estirão urbano da cidade de Macaé. Mais estudos devem ser realizados sobre os tipos de obstáculos, vegetação e outros “empecilhos” que possam aumentar o coeficiente de rugosidade (n), e resultar num maior controle das cheias urbanas no município.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, *MOHID Land*, bacia hidrográfica, Rio Macaé

ABSTRACT

Urban flood events stand out as one of the most comprehensive natural disasters in the country (BRAZIL, 2012), with recurrent local effects in medium and large cities. Using of computational models of varied complexity aids to understand the hydrological dynamics of the water bodies under analysis, besides allowing the simulation of interest scenarios (HORA et al., 2011; PESSANHA, 2012). In this perspective, the aim of this work was to construct a hydrological model of the Rio Macaé river basin (RH-VIII), using *MOHID Land* software and the simulating specific scenarios aimed at controlling the regions of the urban Macaé area. The simulated scenarios were: *i.* dam located upstream of the Ponte do Baião area (Bicuda Pequena, Macaé); and *ii.* increasing Manning Coefficient within channel (0.035 to 0.08). The results indicate that as maximum flows obtained were compatible with previous versions (BARBOZA

⁴ Este trabalho faz parte da dissertação “Estudo de propostas de mitigação de cheias como subsídio ao plano de recursos hídricos da região hidrográfica VIII”, apresentada ao IFFluminense.

(2014); Water Resources Plan (INEA, 2013)). An analysis of the flood hydrographs ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) indicates that, among the interventions simulated, the increase of the roughness coefficient (n) in the retinized stretches obtained larger attenuation than the of the non-urban spruce peak of the city of Macaé. More information should be given on the types of obstacles, vegetation and other "hindrances" that increase the roughness coefficient (n), and thus result in a greater control of urban floods in the municipality.

Key words: *hydrological modeling, MOHID Land, hydrographic basin, Macaé River*

INTRODUÇÃO

Os eventos de cheias urbanas se destacam como um dos desastres naturais de maior abrangência no país, com efeitos locais recorrentes nas médias e grandes cidades. Só o estado do Rio de Janeiro possui 56 registros oficiais de alagamentos excepcionais caracterizados como desastre, contabilizados entre os anos de 1991 e 2012 (CEPED, 2013). O acelerado processo de urbanização constitui um dos principais fatores responsáveis pelo agravamento dos problemas relacionados às inundações nas cidades, aumentando a frequência e os níveis das cheias. A inexistência de Planos Diretores de Drenagem Urbana, capazes de equacionar os problemas de drenagem sob o ponto de vista da bacia hidrográfica, também é apontado como fator relevante para o agravamento do problema (SÃO PAULO, 1998).

De acordo com o marco legal brasileiro relativo à Gestão de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97), a bacia hidrográfica constitui a unidade de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, e, portanto, unidade territorial de planejamento (BRASIL, 1997). Na perspectiva de um estudo hidrológico, a bacia hidrográfica é definida como: *uma unidade fisiográfica limitada por divisores topográficos, de forma que a área de drenagem em seu interior recebe a água precipitada, conduzindo-a até o exutório* (MIGUEZ *et al*, 2016). Ainda segundo os autores, suas principais características de interesse considerando o projeto de sistemas de drenagem são: (i) a área de drenagem da bacia; (ii) as linhas principais de escoamento concentrado; e (iii) o uso do solo e tipo de cobertura vegetal.

Uma das formas mais consagradas de avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste no desenvolvimento e aplicação de modelos de simulação hidrológica com auxílio de técnicas de mapeamento (VIOLA *et al*, 2009). Os modelos atuais integram os processos dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos em apenas uma ferramenta e muitas vezes estão também associados à Sistemas de Informação Geográfica (SIG ou GIS) (TOMINAGA, 2013). Os GIS possibilitam unificar as informações topográficas da bacia hidrográfica em um modelo digital de terreno (MDT), utilizado como base para a realização de simulações numéricas relativas aos processos hidrológicos de ocorrência na bacia hidrográfica (TELLES, 2016).

A simulação de modelos matemáticos requer a solução de sistema de equações, que demandam a utilização de ferramentas computacionais para o processamento dos cálculos (CANHOLI, 2014). Dentro dos *softwares* de modelagem computacional disponíveis para execução da modelagem hidrológica, há a plataforma MOHID, sistema de modelagem numérica tridimensional desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) no Centro de Estudos MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Portugal. O MOHID *Land* é o núcleo executável projetado especificamente para simular a bacia hidrográfica e seus processos, tais como os fenômenos de precipitação, infiltração, *runoff* e drenagem (MOHID, 2016).

Além de auxiliar a compreensão da dinâmica hidrológica dos corpos hídricos em análise, a utilização de modelos computacionais permite a simulação de cenários de interesse, auxiliando o processo de tomada de decisão pelos gestores (HORA *et al.*, 2011; PESSANHA, 2012). Nessa perspectiva, o objetivo do trabalho foi construir um modelo hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Macaé, visando a simulação de cenários de interesse para o controle das cheias no município de Macaé. A bacia situa-se em região de sucessivos eventos de inundações, com elevado contingente de habitantes afetados. No período de 1991 a 2012, quatro ocorrências foram consideradas dentre os eventos humanos de maior severidade, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013).

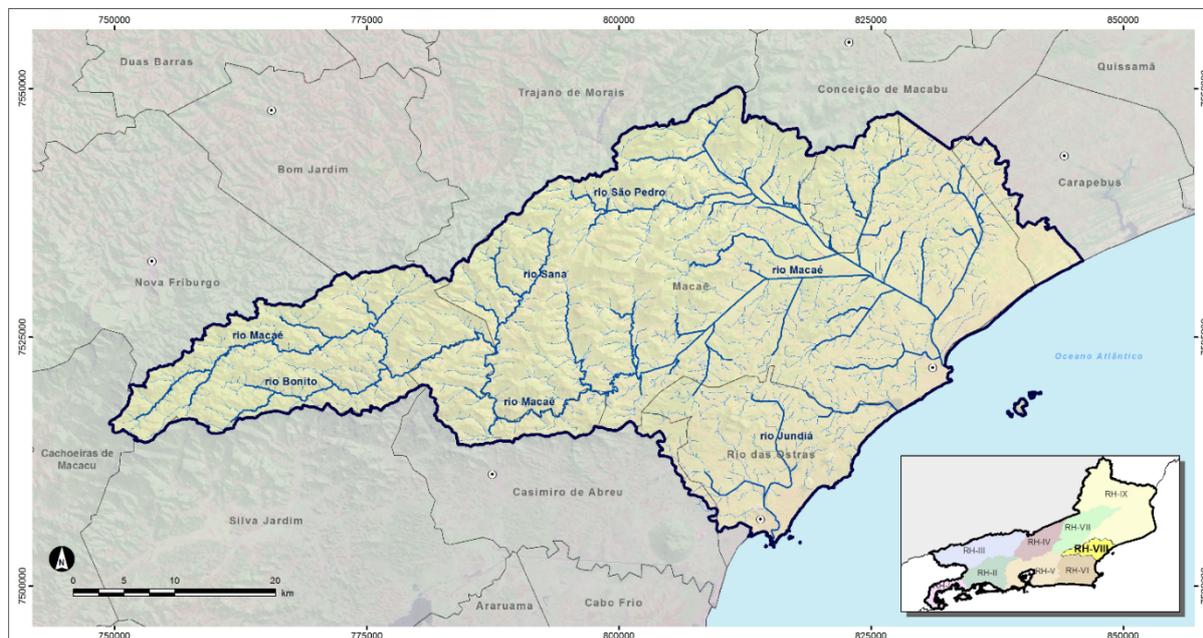
METODOLOGIA

Etapas de construção do modelo digital de terreno (MDT), delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Macaé (RJ) e descrição de demais parâmetros considerados na modelagem, através da ferramenta numérica *MOHID Land*, por meio da interface gráfica *MOHID Studio*. Essa interface constitui um sistema integrado que permite gerir e criar arquivos de dados, gerar simulações e analisar os resultados do modelo (MARETEC, 2012). Ao final desta seção, segue detalhamento sobre os principais cenários de intervenção simulados: barramento de contenção de cheias na Ponte do Baião e aumento do Coeficiente de Manning nos trechos retinizados do Rio Macaé.

Área de Estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Macaé

A Bacia 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, totalizando uma área de 1.978 km² (PLANO MACAÉ/OSTRAS, 2016).

O Rio Macaé tem sua nascente na região serrana ao norte do Estado do Rio de Janeiro, situada no município de Nova Friburgo. Envoltos pelas cadeiras montanhosas da Serra do Mar, onde nasce com altitude aproximada de 1.600 metros, o Rio Macaé percorre 136 quilômetros



Mapa 1. Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII)

Fonte: CBH Macaé/Ostras

até desaguar no Oceano Atlântico, próximo à cidade de Macaé (MARÇAL, 2013). No mapa 1 estão representados, geograficamente, a região de interesse, o rio Macaé e seus afluentes principais, bem como os municípios pertencentes a bacia hidrográfica no Estado do Rio de Janeiro.

A Plataforma MOHID

O MOHID (*Water Modelling System*), sistema de modelagem numérica tridimensional, vem sendo notadamente desenvolvido e aprimorado desde 1985, por uma equipe de técnicos colaboradores do centro de investigação *Marine and Environmental Technology Research Center* (MARETEC), pertencente ao Instituto Superior Técnico integrado à Universidade Técnica de Lisboa. Iniciado como um modelo bidimensional forçado pela maré, o estágio atual do MOHID contempla uma filosofia de modelagem integrada, permitindo a utilização do modelo em suas abordagens uni, bi e tridimensional, com aplicações em diversas regiões costeiras e estuarinas (MARETEC, 2012; TELLES *et al*, 2016).

O programa é composto por distintas interfaces gráficas, conjunto de programas de pré e pós-processamento de dados necessários para os diferentes programas numéricos do MOHID. As principais interfaces gráficas do MOHID constituem:

- **MOHID GUI** (*Graphical User Interface*): interface gráfica do usuário para gerir a organização estrutural de todos os arquivos necessários para configurar uma simulação numérica do MOHID;
- **MOHID GIS** (*Geographic Information System*): sistema de informação geográfica capaz de gerir os dados das variáveis de tempo e espaço requeridos ou produzidos pelos programas numéricos do MOHID;
- **MOHID Post**: interface gráfica do usuário que exibe dados armazenados em arquivos HDF como animações na tela;
- **MOHID Time Series Editor**: interface gráfica do usuário que permite a visualização, de modo rápido, dos dados das séries temporais requeridos ou produzidos por programas numéricos do MOHID.

(BRAUNSCHWEIG e FERNANDES, 2010)

Na interface gráfica MOHID GUI estão disponíveis as seguintes ferramentas numéricas do MOHID:

- **MOHID Water**; adequado à modelagem dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenômenos de dispersão, propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água/processos biogeoquímicos na coluna d'água e trocas com o fundo;
- **MOHID Land**: projetado para simular bacia hidrográfica e aquíferos;
- **MOHID River**: Network: que permite a simulação de redes hidrográficas;
- **MOHID Soil**: que simula o fluxo de água através de meios porosos.

(MOHID, 2016)

A integração dessas ferramentas permite estudar o ciclo da água em uma abordagem integrada, possibilitando inclusive a gestão da bacia e a simulação de inundações, por exemplo, através da integração do MOHID *Water* e *Land* pelo módulo descargas (MOHID, 2016). O fluxograma a seguir (figura 1) correlaciona as interfaces gráficas presentes na plataforma MOHID, bem como as ferramentas numéricas utilizadas nas simulações.

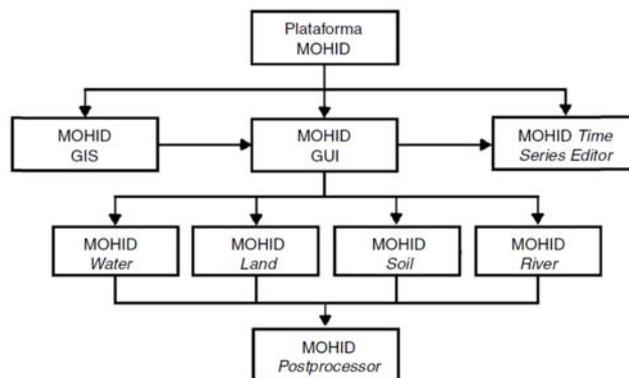


Figura 1. Fluxograma das interfaces gráficas presentes na plataforma MOHID e as ferramentas numéricas utilizadas para a execução das simulações.

Fonte: TELLES *et al*, 2012

Etapas da construção do modelo

A construção do modelo hidrológico da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras pelo MOHID Land consistiu na criação de um projeto de simulação hidrológica de inundação de uma bacia hidrográfica permeável, contemplando as etapas de (i) *definição da área de interesse*; (ii) *criação de modelo digital de terreno (MDT)*; (iii) *construção das seções transversais*; (iv) *delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica*; (v) *construção das seções transversais*; (vi) *ajuste dos Coeficientes de Manning*; (vii) *chuva de Projeto*; e (viii) *cálculo do CN*.

Localização da área de interesse

A localização da bacia hidrográfica foi realizada através do Bing Aerial, mapa importado diretamente pela interface GIS do MOHID *Studio*. O processo iniciou-se pela identificação de seu exutório da bacia junto a região estuarina, e culminou com a identificação da região de Nova Friburgo, pontos considerados de referência para a delimitação da bacia (figura 2).

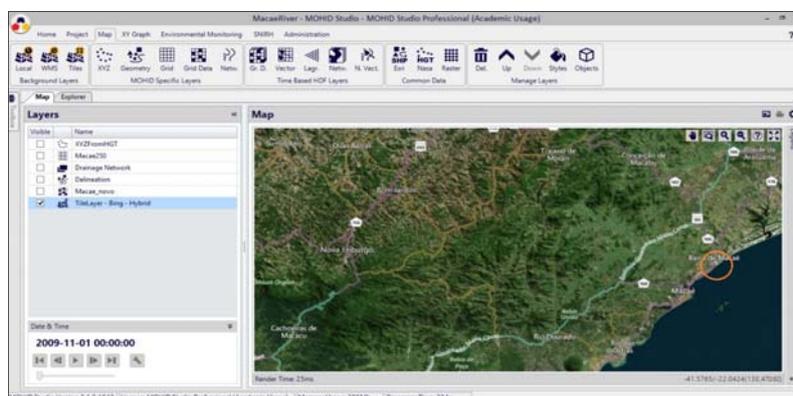


Figura 2. Detalhe da localização da área de interesse na interface GIS do MOHID *Studio*, evidenciando o exutório da bacia, indicado em círculo vermelho.

Fonte: autores

Criação do modelo digital de terreno (MDT)

O modelo digital de terreno é uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado (BURROUGH, 1986). Para a representação de uma superfície real através do computador é fundamental a criação de um modelo digital, que pode ser obtido por meio de equações analíticas ou por uma rede de pontos na forma de uma grade, ou *grid* (VIVIANI e MANZATO, 2005). A criação de um MDT na interface MOHID GIS requer: (i) a construção de um *grid* horizontal; (ii) a importação de dados de elevação de terreno; e a (iii) a delimitação poligonal de áreas não consideradas na modelagem (BRITO *et al.*, 2013).

A construção do terreno digital foi estruturada em *grid* horizontal com células aproximadamente 250 metros. Após definidas as especificações de tamanho das células, o *grid* foi então projetado sobre a área de interesse, conforme apresentado na figura 3. Os *grids* são arquivos que definem uma grade espacial e os respectivos valores da célula central, utilizado nas ferramentas numéricas do MOHID (BRAUNSCHWEIG e FERNANDES, 2010)

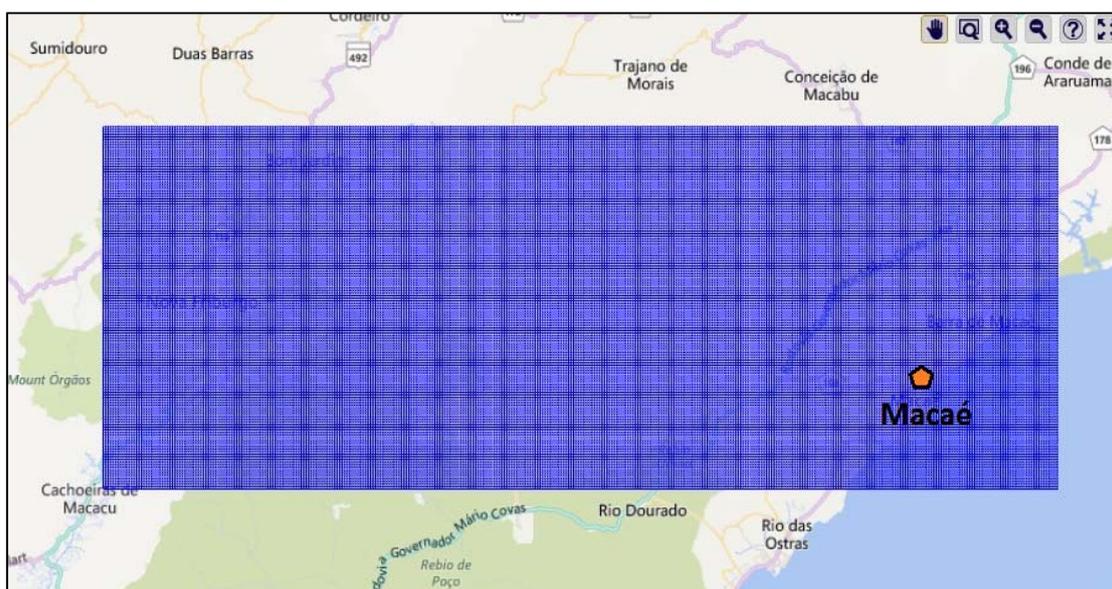


Figura 3. Construção do grid com células de 250m sobre a região de Macaé.

Fonte: autores

Para a geração do MDT, também é necessária a obtenção de informações altimétricas do terreno, que configurem o contexto geomorfológico do mesmo. A aquisição destes dados pode ser realizada por levantamentos de campo, digitalização de mapas, medidas fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos ou dados altimétricos adquiridos por meio de receptores GPS e satélites (VIVIANI e MANZATO, 2005; GONÇALVES *et al.*, 2003). O MOHID Land utiliza arquivos de topografia como dados de elevação de terreno (BRAUNSCHWEIG e FERNANDES, 2010).

As informações topográficas da bacia hidrográfica do Rio Macaé foram obtidas por meio da série de dados do TOPODATA. O projeto Topodata, do Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais (INPE), oferece um modelo digital de elevação (MDE) elaborado a partir dos dados SRTM (*Shutter Radar Topography Mission*) da NASA, refinados para a resolução de 30m (VALERIANO, 2005). A obtenção dos dados foi realizada a partir da seleção da folha de

interesse, na lista de arquivos disponíveis para a mesma, através do acesso respectivo ao conjunto de arquivos na extensão ASCII, coordenadas XYZ.

Para tornar os arquivos topográficos do *grid* apropriados ao MOHID *Land*, eles devem ser livres de depressões. Esse procedimento é considerado crucial no desenvolver do modelo, possibilitando que o terreno digital se assemelhe com o meio físico, e evitando, assim, o surgimento/desaparecimento de canais na rede de drenagem ou, até mesmo, locais de armazenamento indevidos. Na versão MOHID Studio, a remoção de depressões é realizada de maneira iterativa. Nele, cada célula do arquivo contendo o MDT é analisada considerando-se as células vizinhas, evitando a criação de depressões inexistentes no meio físico, como por exemplo, sumidouros que possam aparecer no arquivo digital (TELLES *et al*, 2016; TELLES *et al*, 2012).

Por fim, foi realizada a delimitação poligonal de áreas não consideradas na modelagem, tais como regiões de águas costeiras e estuarinas que não pertencem à bacia hidrográfica em análise e precisam ser removidos do MDT final (BRITO *et al*, 2013). A delimitação dos polígonos foi realizada de acordo com a rotina do MOHID *Studio*. O procedimento é realizado de maneira manual, através da definição dos pontos limites dos corpos hídricos que não deverão ser computados no modelo. Ao final da seleção, o MOHID *Studio* gera automaticamente os polígonos formados pelos pontos.

Delimitamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica

O delineamento ocorreu utilizando a rotina apropriada do MOHID *Land*, gerando o padrão apresentado na figura 4. Uma vez constituído o MDT, a partir de dados da NASA (SRTM), é necessário informar as coordenadas do exutório da bacia, e a área mínima de drenagem (100.000 m²). A partir dessas definições, o MOHID gera automaticamente uma rede de drenagem com 6 ordens (Número de *Strahler*), detalhadas no item a seguir.



Figura 4. Delimitação da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Macaé, obtida pelo MOHID *Land*.

Fonte: autores

Construção das seções transversais

A construção das seções transversais constitui etapa fundamental ao cálculo da vazão de um canal, obtido através do produto da velocidade de fluxo pela área da seção transversal (FREITAS, 2011). A seção transversal ou seção molhada do canal representa tanto as dimensões de sua área quanto a sua própria forma, vistas pelos valores mensurados de largura e profundidades do canal (CUNHA, 1996). A seção transversal de um rio ou de um canal se diferencia pela regularidade de sua forma. As seções transversais de rios apresentam formas irregulares, que tendem a se modificar com o tempo, em função de processos de sedimentação ou de erosão (MIGUEZ *et al*, 2016).

No presente trabalho, as seções transversais da rede de drenagem foram obtidas do documento Diagnostico da Bacia Hidrográfica, elaborado pela Universidade Candido Mendes e patrocinado pela Petrobras (2011). O estudo analisou vinte e quatro seções transversais, selecionadas e mensuradas em campo, as quais serviram como referência espacial para a obtenção de parâmetros físicos ao longo do Rio Macaé.

De posse dos respectivos valores, a construção das seções transversais no MOHID *Studio* foi executada por meio da ferramenta *Cross Section Definition*. A ferramenta possibilita a construção de seções transversais através de duas formas distintas: relacionadas ao número de *Strahler* ou à área drenada, sendo de geometria trapezoidal. Para essa finalidade, é necessário informar a largura do topo, do fundo e altura da seção para cada um dos números de *Strahler* contidos na rede ou para as áreas drenadas, conforme escolha do usuário (TELLES *et al*, 2016). No presente estudo, as seções irregulares obtidas no diagnóstico ambiental foram adaptadas ao formato trapezoidal por aproximação.

Ajuste dos Coeficientes de Manning

De acordo com a teoria do escoamento em canais abertos, o coeficiente de rugosidade de *Manning* é um dos principais parâmetros para descrição da vazão sobre uma superfície (LYRA *et al*, 2010). A fórmula de Manning é uma expressão do denominado coeficiente de Chézy, utilizado na fórmula de Chézy para o cálculo da velocidade da água em canais abertos e tubulações. Tais fórmulas constituem as expressões mais comumente utilizadas para representação do escoamento uniforme, ambas desenvolvidas de forma empírica (MIGUEZ, *et al*, 2016).

Segundo MIGUEZ *et al* (2016), a expressão da fórmula de *Manning* pode ser descrita como:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2}$$

Onde:

Q - vazão (m³/s)

n - coeficiente de Manning

A - área molhada da seção transversal (m²)

R - raio hidráulico (m)

S₀ - declividade do fundo (m/m)

Devido à simplicidade de sua forma e dos resultados satisfatórios em aplicações práticas, especialmente oriundos dos numerosos experimentos desenvolvidos em rios, a equação de Manning acabou por adquirir um uso mais difundido, sendo utilizada intensivamente na modelagem hidrológica de cursos d'água (LYRA *et al*, 2010). O coeficiente de *Manning* depende, dentre outros fatores, das características do material, das formas de fundo, das irregularidades geométricas, da rugosidade da superfície, da presença de vegetação e obstruções, do alinhamento do canal, dos meandros e da própria profundidade do escoamento (CHOW, 1959; MIGUEZ *et al*, 2016).

Uma das dificuldades da aplicação da equação de Manning é justamente a definição do valor do coeficiente de rugosidade do rio ou canal. Chow (1959) apresenta em seu livro, *Open-Channel Hydraulics*, um guia de orientação para a determinação do coeficiente, oferecendo uma vasta tabela com valores para canais naturais, artificiais, bem como para as planícies de inundação. O autor também inclui uma sequência ilustrativa com fotografias de diversos canais típicos, acompanhadas de sua descrição e de seus respectivos coeficientes de rugosidade, permitindo assim, reduzir o viés de arbitrariedade associado à estimativa do parâmetro.

O ajuste e definição dos coeficientes de *Manning* foram realizados com base na metodologia de Chow (1959). Para o cálculo da rugosidade do canal, foi-se adotado um coeficiente (*n*) de 0,035. Tal ajuste foi realizado a partir do módulo *drainage network*. Já no módulo *runoff*, foram feitos os ajustes do coeficiente para as planícies de inundação e demais superfícies da bacia. Utilizou-se arquivo com informações de uso dos solos fornecido pelo INEA, em formato SHP (*shapefile*).

Para cada categoria delineada no arquivo, foi atribuído um valor específico do coeficiente de *Manning* (*n*). Para melhor seleção e adequação dos valores, foram consideradas as descrições de cada tipo de uso de solo, de acordo com os documentos: Manual Técnico da Vegetação Brasileira (2012) e Manual Técnico do Uso da Terra (2013), ambos do IBGE. Os coeficientes de cada tipo de uso de solo foram então atribuídos de acordo com as categorias elencadas nas tabelas fornecidas por Chow (1959). Os valores arbitrados em cada categoria são apresentados na tabela 1.

Chuva de Projeto

Conforme o desenvolvimento do modelo avançou em complexidade, maior foi a necessidade de utilização de séries históricas de precipitação, as quais, muitas vezes, não estão disponíveis pela inexistência ou pela descontinuidade de monitoramento pluviométrico. Nesses casos, dados de locais próximos podem ser utilizados, porém havendo comprometimento na confiabilidade dos resultados. Em sistemas maiores requer-se, muitas vezes, não só a distribuição da precipitação no tempo, mas também sua variação especial (CANHOLI, 2014).

Atualmente, a bacia do rio Macaé conta com uma rede de monitoramento pluviométrico que inclui 12 estações de diversas entidades e de períodos distintos de implantação. Oito dessas estações compõem o Sistema de Alerta de Cheias, criado pelo Instituto Estadual do Ambiente - INEA, órgão da Secretaria de Estado do Ambiente - SEA, com o objetivo de informar às auto-

Tabela 1. Coeficiente de Rugosidade de *Manning* por Tipos de Usos do Solo

Tipos de Uso do Solo (IBGE, 2012; 2013)	Coeficiente de rugosidade de <i>Manning</i> (n)
Afloramento Rochoso	0,045
Água	0,035
Áreas úmidas	0,04
Campo	0,04
Campo úmido	0,05
Cordões Arenosos	0,025
Floresta Estacional Semidecidual de Terras Baixas	0,1
Floresta Estacional Semidecidual Submontana	0,08
Floresta Ombrófila Densa Alto Montana	0,16
Floresta Ombrófila Densa Montana	0,16
Floresta Ombrófila Densa Submontana	0,16
Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas	0,18
Floresta Ombrófila e Formações Pioneira Submontana	0,15
Mangue	0,01
Ocupação Antrópica	0,04
Restinga	0,06

ridades e à população quanto à possibilidade de chuvas intensas e de inundações graduais (cheias) que possam causar perdas materiais e humanas. O Sistema de Alerta possui uma rede de estações telemétricas e de radares meteorológicos que enviam, em tempo real, dados de chuva e do nível dos rios monitorados (INEA, 2017).

Das oito, cinco estações - Barra do Sana, Fazenda Airis, Ponte do Baião, São Pedro e Galdinópolis - foram implantadas pela Hicon Engenharia no contexto do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento mantido pela UTENF na bacia do rio Macaé (ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2011). As estações Piller, Macaé de Cima e Glicério tiveram os sistemas telemétricos instalados em 2012, num segundo projeto P&D, também mantido pela UTE e realizado pelas empresas Hicon Engenharia e Ecologus (ECOLOGUS, HICON, UTENF, 2013). Há ainda, duas estações de responsabilidade da ANA, que ainda não possuem monitoramento telemétrico: Fazenda São João e Fazenda Oratório. Próximo à foz do rio Macaé encontra-se a estação automática, de responsabilidade do INMET, denominada Macaé, além da estação Jusante BR-101 (Severina) de responsabilidade da UTE Norte Fluminense (BARBOZA, 2014).

A despeito da existência da rede de monitoramento implantada na bacia do rio Macaé, dificuldades relacionadas aos diferentes períodos de implantação das estações e à descontinuidade das séries históricas de longa duração motivaram a busca por outras formas de representação do fenômeno da precipitação no modelo. Dessa forma, foi definida uma chuva

padrão máxima para qual o sistema de drenagem, a ser avaliado nas simulações, tenha plena capacidade de resposta ao volume de água precipitado. Essa chuva é denominada e descrita na literatura como *chuva de projeto*. Os aspectos fundamentais para sua elaboração consistem: na *área de abrangência* (que se refere à *área de drenagem que recebe a chuva*), no *tempo de duração* da chuva e na *probabilidade de ocorrência*. (MIGUEZ *et al*, 2016).

- *Área de abrangência*

A área de drenagem constitui a superfície em projeção horizontal, delimitada pelos divisores de águas que confinam e definem a bacia. A área de drenagem é computada diretamente a partir de cartas topográficas, sendo um dado fundamental na definição da potencialidade hídrica de uma bacia, visto que consiste na região que recebe as águas de chuva. Também constitui o elemento básico para o cálculo das outras características físicas (CANHOLI, 2014; MIGUEZ *et al*, 2016). A *área de abrangência* considerada no modelo foi de 1.765 km², que representa a área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Macaé (PLANO MACAÉ-OSTRAS, 2016).

- *Tempo de duração*

O *tempo de duração* da chuva representa o período total em que ocorre a precipitação, com uma relação inversamente proporcional à intensidade da chuva. A estimativa da chuva de projeto a ser utilizada no dimensionamento de uma rede de drenagem tradicional considera, normalmente, um tempo de duração igual ao tempo de concentração da bacia de contribuição, de forma a avaliar a vazão máxima produzida pela bacia, considerando um dado tempo de recorrência. O *tempo de concentração* (*tc*) é o tempo de percurso da água precipitada desde o ponto cinematicamente mais afastado da bacia hidrográfica até a seção de referência. (HERLADER MATA-LIMA *et al*, 2007).

Para o cálculo do tempo de concentração da bacia, faz-se necessário definir a *declividade média* do curso d'água, da nascente até o local de interesse. Barboza (2014), argumenta que, geralmente, em estudos hidrológicos, determina-se a declividade baseada nos extremos, que possui como inconveniente a superestimava da declividade média do curso d'água e, conseqüentemente, a velocidade do curso d'água e o pico de cheia. Alternativamente, existe o conceito de *declividade ponderada - ou declividade equivalente*, metodologia utilizada nesse trabalho e também utilizada pelo INEA em estudos de recursos hídricos no estado do Rio de Janeiro. Além de representar de maneira mais satisfatória a declividade do rio Macaé, a declividade ponderada é mais indicada visto as peculiaridades da bacia em questão, especialmente nos locais de transição entre a região serrana e a planície costeira (BARBOZA, 2014).

Por fim, utilizou-se a formulação de George Ribeiro (RIBEIRO, 1961) para o cálculo do Tempo de Concentração (*tc*), expressa na equação a seguir:

$$tc = \frac{16 \cdot L}{(1,05 - 0,2p)(100 \cdot I)^{0,04}}$$

Onde:

T_c - Tempo de concentração (min)

L - Comprimento do curso d'água (km)

I - Declividade (m/m)

P - Parâmetro correspondente ao percentual da área da bacia coberta por vegetação

- *Probabilidade de ocorrência*

A componente relativa à *probabilidade de ocorrência* do evento está relacionada a um período de retorno, ou *tempo de recorrência* (TR). O tempo de recorrência compatibiliza os fatores de segurança (risco de falha) com os fatores econômicos (períodos de retorno elevados estão associados com chuvas de projeto de grande intensidade, e, conseqüentemente, obras superdimensionadas, portanto, onerosas). O tempo de recorrência é definido como o período de tempo em que determinado evento poderá ser igualado ou superado, ao menos uma vez, sendo relacionado à frequência de ocorrência desse evento (f).

Segundo MIGUEZ *et al* (2016), o tempo de recorrência pode ser calculado conforme expressão a seguir:

$$TR = 1/f$$

Onde:

TR - Tempo de Recorrência (anos)

f - Frequência ou probabilidade de ocorrência do evento TR em um ano.

A primeira decisão a ser tomada no cálculo refere-se ao nível de segurança exigido para o sistema, relacionado ao tempo de recorrência da chuva que será utilizada para o projeto. Caso os prejuízos potenciais forem elevados, deve-se adotar um período de retorno alto; em caso contrário, um período de retorno baixo deve ser considerado. Dessa forma, deve-se ponderar entre a segurança requerida e o custo de implantação do sistema na definição do tempo de recorrência da chuva de projeto (MIGUEZ *et al*, 2016). Neste trabalho, foram utilizadas chuvas de projeto com tempos de recorrência de 20 e 50 anos. O quadro 1 apresenta os valores de referência para TR de distintas características de um sistema de drenagem tradicional.

**Tempo de Recorrência (TR) para chuvas de projeto em sistemas de drenagem
(SÃO PAULO, 1998)**

Características do sistema	TR (anos)
Microdrenagem	2 a 10
Macro-drenagem	25 a 50
Grandes corredores de tráfego e áreas vitais para a cidade	100
Áreas onde se localizam instalações e edificações de uso estratégico, como hospitais, bombeiros, polícia, centros de controle de emergências, etc.	500
Risco de perda de vidas humanas	100 (mínimo)

Quadro 1. Tempo de Recorrência (TR) para chuvas de projeto em sistemas de drenagem
Fonte: SÃO PAULO, 1998

Por fim, com base na *área de abrangência*, *tempo de duração* e na *probabilidade de ocorrência*, foi-se calculada a chuva de projeto. O cálculo baseou-se nos trabalhos de DER-RJ (1989) e de Barboza (2014), e se apropria da equação a seguir para o cálculo da chuva de projeto. Segundo Pruski *et al* (1999), a chuva de projeto pode ser expressa como:

$$P = \frac{a \cdot TR^b}{(t \cdot 60 + c)^{d \cdot t}}$$

Onde:

P - Precipitação (mm)

TR - Tempo de recorrência definido (anos)

t - Duração da precipitação (horas)

a, b, c e d - Parâmetros definidos para cada estação pluviométrica estudada.

O cálculo da precipitação intensa pela equação de DER-RJ só é válido para chuvas com durações iguais ou superiores a 24 horas. Foi realizada uma extrapolação exponencial para o período inicial, entre 6 e 24h. Em relação aos valores dos parâmetros a, b, c e d , apenas foi utilizado o parâmetro relativo à Macaé, compreendendo uma simplificação do fenômeno da precipitação, através de um padrão de chuva homogênea (tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros de Equações de Chuvas Intensas

Estação	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Cachoeira de Macacu	726,00	0,26	9,00	0,73
Fazenda Mendes	544,00	0,15	10,00	0,68
Fazenda Oratório	1494,00	0,21	15,00	0,81
Macaé	444,26	0,26	6,27	0,66
Piller	979,00	0,24	12,00	0,73

Fonte: DER-RJ, 1989; PRUSKI *et al*, 1999

Cálculo do CN

Dentro dos processos de escoamento e infiltração modelados na plataforma *MOHID*, insere-se o parâmetro denominado *Curve Number* (CN), ou curva-número, em português. O CN trata principalmente da representação da infiltração, afetando também a abstração inicial, e sendo ajustado em função de quatro categorias distintas de solo, além de diversos padrões de uso e ocupação do solo. Apresenta a vantagem de poder ser corrigido com as condições de umidade do solo anteriores à ocorrência da chuva. A determinação do CN responde pelo tipo de solo e por sua ocupação, bem como por suas características hidrológicas (MIGUEZ *et al*, 2016).

O valor de CN varia de 0 a 100. Para áreas completamente impermeáveis considera-se CN = 100. Através dele, calcula-se uma infiltração potencial de modo que o escoamento superficial só ocorre quando a precipitação passa a superar uma abstração inicial que é função deste valor. O cálculo do CN médio se dá pela média ponderada pela área dos valores de CN presentes ao longo da bacia de contribuição (BARBOZA, 2014).

Nesse trabalho, os processos de escoamento e infiltração foram modelados na plataforma de acordo com o método *Curve Number* (CN), que considera as diferentes tipologias de solo e vegetação de uma região. Para bacia do Rio Macaé esses dados foram inseridos no modelo através do ficheiro *Porous Media* do *MOHID Land* de acordo com dados reportados por Sartori *et al* (2005) e Sartori (2010).

Alternativas de intervenção para o controle das cheias

Foram avaliadas as seguintes intervenções para o controle das cheias no estirão urbano de Macaé, em diferentes pontos da bacia, com *TR* de 20 e 50 anos.

- *Barragem de contenção de cheias na Ponte do Baião*

As barragens de contenção de cheia são estruturas projetadas para permitirem a retenção temporária de uma expressiva parcela dos volumes precipitados e escoados superficialmente nas cheias de maior porte, aliviando, desta forma, os trechos de jusante. Com o intuito de minimizar o pico das cheias que atingem o curso inferior da bacia do Rio Macaé, foi concebida pela Engenharia Gallioli LTDA, em 1978, uma barragem localizada 6 km a montante da Ponte do Baião (22°23'17.0"S 42°04'55.0"O), que, no entanto, não chegou a ser executada. Ainda de acordo com o relatório da FGV, os estudos concluídos pela empresa Engenharia Gallioli LTDA, em novembro de 1978, foram consubstanciados no documento “Rio Macaé - Projeto das Obras de Regularização e Aproveitamento das Descargas - Relatório” (FGV, 2004).

- *Aumento do Coeficiente de Manning nos trechos retelinizados*

No final da década de 60, a Bacia do rio Macaé teve cerca de 60 km do canal principal retelinizado pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), além de trechos de afluentes como o do rio São Pedro, intervenção que contribuiu à frequência e intensidade das cheias no Rio Macaé (IPGA, 2015; ASSUMPÇÃO e MARÇAL, 2012). As calhas dos rios, córregos e canais, no entanto, podem desempenhar a função de amortecer e retardar as ondas de cheias nesses trechos retelinizados, (CANHOLI, 2014), o que pode ser obtido através do aumento do Coeficiente de Manning. Dessa forma, nas simulações apresentadas adiante, o valor do coeficiente de *Manning* foi aumentado de 0,035 para 0,08, como proposta de intervenção alternativa ao barramento. O valor de 0,08 foi identificado como nos estudos de Chow (1959) como um valor médio característico de um canal dotado de obstáculos, tais como pedras e vegetação herbácea.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações executadas no MOHID *Land*.

Comparação de resultados com estudos anteriores

Os resultados de vazões máximas instantâneas para os tempos de recorrência de 20 e 50 anos nas estações Ponte do Baião e Foz do Rio Macaé são apresentados na tabela 4, a seguir.

Tabela 3. Comparação das vazões máximas (m³) com estudos anteriores, com TR de 20 e 50 anos.

Estações	TR (anos)	MOHID <i>Land</i> (2017)	BARBOZA (2014)	Plano de RH (INEA, 2013)
Ponte do Baião	20	450,00	439,35	560,34
	50	688,00	682,25	665,23
Foz do Rio Macaé	20	649,00	716,37	791,24
	50	987,00	1018,49	932,30

Pela tabela verifica-se que as vazões calculadas pelo MOHID *Land* na Ponte do Baião foram intermediárias aos valores apresentados no estudo de BARBOZA (2014) e Plano de Recursos Hídricos (INEA, 2013). Nesta comparação, os desvios variaram de cerca de 14 e 1,75% para os tempos de recorrência de 20 e 50 anos, respectivamente. Na foz do Rio Macaé, os coeficientes de variação variaram em torno de 10 e 4,5% para os tempos de recorrência de 20 e 50 anos, respectivamente, compreendendo, em média, os menores desvios observados em cada comparação.

Barragem de contenção de cheias

Os hidrogramas de cheias com e sem reservatório são apresentados nas figuras 5 e 6, a seguir:

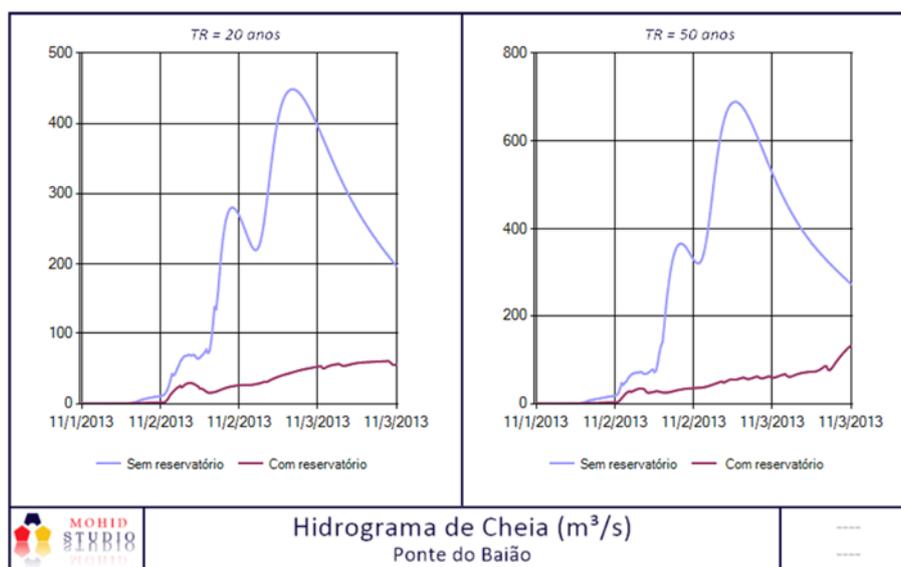


Figura 5. Hidrogramas de Cheia na Ponte do Baião, com e sem reservatório, para TR de 20 e 50 anos.

Os hidrogramas mostram que a atenuação dos picos de cheia é significativa na região da Ponte do Baião, tanto para TR de 20 quanto para o TR de 50 anos. Esses resultados permitem concluir que o eixo da Ponte do Baião é eficiente no controle dos cursos superior e médio do Rio Macaé, conforme Relatório da FGV (2004). Esse resultado é condizente com a finalidade de abastecimento também prevista para esse reservatório, capaz de abastecer o Sistema de captação da CEDAE, localizado nas proximidades da Ponte do Baião, na estrada da Bicuda Pequena, na região serrana de Macaé, conforme fotografia 1.



A atenuação dos picos de cheias de cheias na região urbana da cidade, que pode ser mensurada a partir do ponto na foz do Rio Macaé, no entanto, não apresentou resultados

significativos, conforme pode ser visualizado na figura 6. Esse resultado está de acordo com os estudos apresentados no relatório da FGV (2004), ao considerar a barragem incapaz de proteger a planície da margem esquerda do Rio Macaé, localizada imediatamente a montante da rodovia BR-101, devido à forte contribuição da confluência do Rio São Pedro.

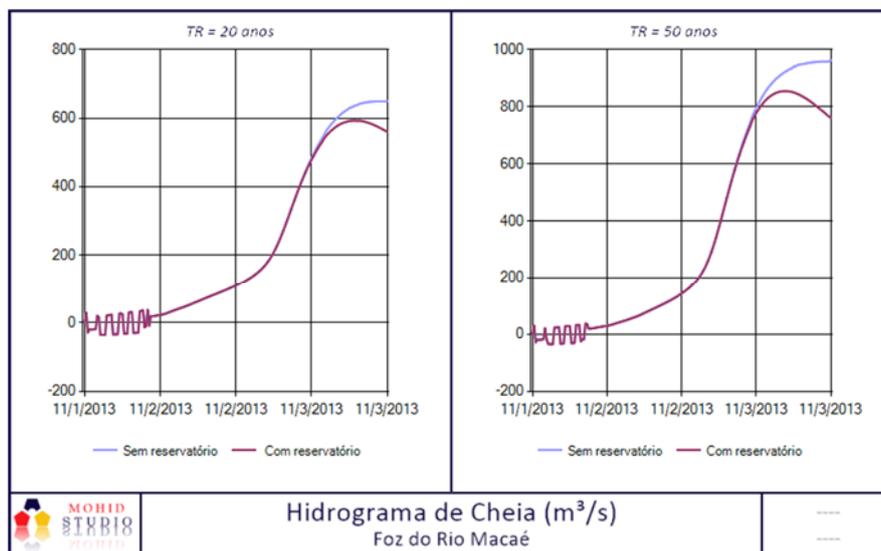


Figura 6. Hidrogramas de Cheias na Foz do Rio Macaé, com e sem reservatório, para TR de 20 e 50 anos.

Aumento do Coeficiente de Manning nos trechos retinizados

Os hidrogramas de cheias com e sem alteração no Coeficiente de *Manning* são apresentados nas figuras 7, a seguir:

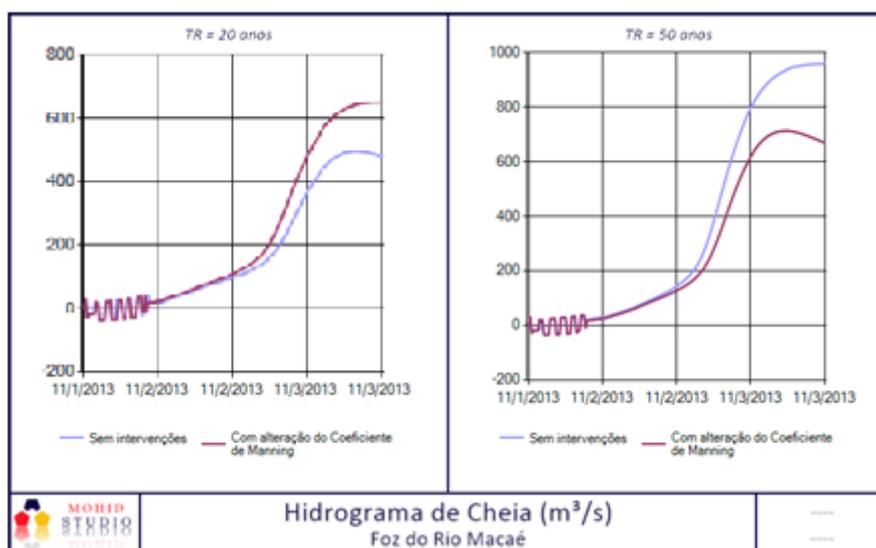


Figura 7. Hidrogramas de Cheias na Foz do Rio Macaé, com e sem alteração no Coeficiente de *Manning*, para TR de 20 e 50 anos.

Os hidrogramas mostram que o aumento do Coeficiente de Manning no trecho retificado, de 0,035 para 0,08, provocou uma atenuação expressiva no pico de cheia correspondente ao TR de 50 anos. Essa alteração simula um efeito de retardamento da onda cheia proveniente da região serrana, através do aumento do coeficiente de rugosidade no canal (n). Segundo CANHOLI (2014), para obtenção deste efeito, pode-se recorrer à adoção de revestimentos rugosos, como gabiões e enrocamentos, ou de revestimentos naturais, como vegetação e grama, desde que compatíveis com as velocidades que se pretenda manter.

Alguns trechos do Rio Macaé evidenciam a carência de vegetação ciliar situada às suas margens, que poderiam atuar no retardamento das ondas de cheia. A fotografia 2 apresenta um trecho situado nas proximidades da Termomacaé, na ponte de cruzamento do Rio Macaé com a BR-101. Já a fotografia 3, mostra as margens do mesmo Rio na sua porção na Ponte do Baião, trecho com maior grau de conservação de sua mata ciliar.



Fotografia 2. Trecho do Rio Macaé, na porção situada nas proximidades da Termomacaé (à esquerda). Detalhes da vegetação situada às margens desse trecho (à direita).

Fonte: própria



Fotografia 3. Trecho do Rio Macaé, na Ponte do Baião, com detalhe para a mata ciliar.

Fonte: Própria

Comparação final das simulações

Os hidrogramas de cheias comparativos dos cenários sem intervenção, com barragem e com alteração do Coeficiente de *Manning* no canal, para TR de 20 e 50 anos, é apresentado na figura 9.

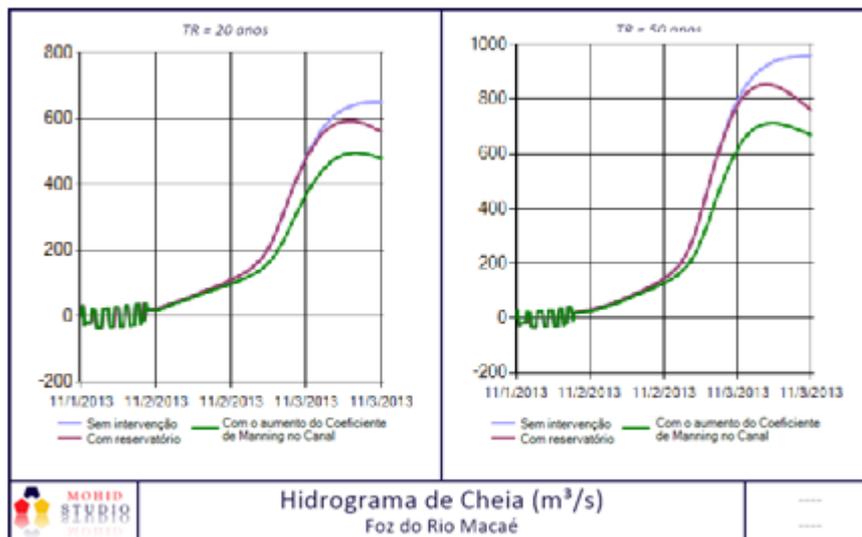


Figura 8. Hidrogramas de Cheias na Foz do Rio Macaé, sem intervenção, com barragem e com aumento do Coeficiente de *Manning* no canal, para TR de 20 e 50 anos.

Os hidrogramas evidenciam que, para uma chuva de TR de 20 anos, ou seja, de menor intensidade, o efeito do reservatório apresenta uma sutil diferença na atenuação do pico de cheia, enquanto que o aumento do coeficiente de rugosidade gerou a maior diminuição no pico nessa comparação. Já para uma chuva de TR de 50 anos, ou seja, de maior intensidade, o aumento do coeficiente de rugosidade nos canais também apresentou uma performance superior comparada ao barramento na atenuação da onda de cheia, um indicativo de que, dentre as analisadas, essa medida é mais satisfatória na mitigação de cheias mais intensas que venham a afetar a região urbana de Macaé.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que o efeito do barramento não é significativo na atenuação dos picos de cheia ocasionados na região urbana de Macaé. A alternativa que apresentou melhores resultados consistiu no aumento do Coeficiente de *Manning* no interior dos canais. Recomenda-se, portanto, mais estudos sobre os tipos de obstáculos, vegetação e outros “empecilhos” que possam aumentar o coeficiente de rugosidade, e resultar numa maior atenuação dos hidrogramas de cheia.

Os resultados obtidos nesse trabalho atuam na escala de sub-bacia, e baseiam-se em princípios que objetivaram aumentar o tempo de retenção dos deflúvios, acelerado devido às obras de retificação executadas na década de 60 pelo DNOS. Melhores resultados associados à questão da atenuação dos picos de cheia podem ser obtidos a partir da complementação das medidas apresentadas com soluções de microdrenagem, que podem ser implementadas em regiões críticas da cidade e simuladas em uma modelagem que contemple uma escala pormenorizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSUMPÇÃO, A. P.; MARÇAL, M. S. **Retificação dos canais fluviais e mudanças geomorfológicas na planície do Rio Macaé.** Revista de Geografia UFPE, V. 29, No. 3, 2012.

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

BRAUNSCHWEIG, F.; FERNANDES, L. MOHID: **Interfaces gráficas do usuário: manual do usuário.** Tradução de Bianca Cordeiro Freire e Haydda Manolla Chaves da Hora; revisão da tradução para língua portuguesa: Edson Carlos Nascimento; revisão técnica: Jader Lugon Jr. Campos dos Goytacazes. Essentia Editora, 2010.

BRITO, D.; *et al.* **MOHID Studio Quick Start Guide for MOHID Land: User Guide for setting up MOHID Land Projects with MOHID Studio Professional Edition.** Draft. Action Modulers. 2013.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** New York, Oxford University Press, 1986. CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** 2ª ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2014.

CEPED UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais de 1991 a 2012.** 2ª edição revista e ampliada, 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER-RJ. Estudo de Chuvas Intensas do Estado do Rio de Janeiro. Departamento de Estradas e Rodagem - 1989.

DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem.** Publicação IPR-715. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Ministério dos Transportes. Brasil. 2005.

ECOLOGUS, HICON, UTENF. **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,** 2013.

FREITAS, 2011. **Diagnóstico Socioambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé.** Projeto Macaé Rio Sustentável. Universidade Cândido Mendes, 2011.

GAROFALO, D.; LIENBERG, V.; **Análise comparativa da informação altimétrica presente nos modelos digitais de elevação ASTER GDEM 1 e 2, SRTM e TOPODATA.** Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa-PB. 2015.

GONÇALVES, M.; CARVALHO, C.; VIEIRA, A. **Geração de Modelo Digital de Terreno a partir de Mapas Digitais 3D: estudo de caso visando garantir o contexto geomorfológico com redução dos dados amostrais.** Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 9, no 1, p.105-119, 2003.

GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da; **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3 ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 1998.

HERLADER MATA-LIMA *et al.* **Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(3): 525-536, jul. set. 2007.

HORA, Haydda Manolla Chaves *et al.* **Modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento dos recursos hídricos: uma alternativa para abordagem de problemas de usos múltiplos**. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 5 n. 1, p. 71-87, jan. / jun. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Uso da Terra**. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO URBANO E GESTÃO AMBIENTAL (IPGA). **Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé**. 1a ed. Rio de Janeiro: Editora Nova Triade do Brasil Ltda, 2015.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE - INEA - **Conhecendo o Sistema de Alerta de Cheias**. Disponível em: <<http://alertadecheias.inea.rj.gov.br/>> Acesso em: 06 set 2017.

LYRA, Guilherme B. *et al.* **Coefficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, n.4, p.343–350, 2010.

MARÇAL, M. **Análise das Mudanças Morfológicas em seções transversais ao Rio Macaé/RJ**. Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 14, nº 1, 2013.

MARETEC, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. **Descrição do MOHID**. Tradução: Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues. Revisão da tradução para a língua portuguesa: Edson Carlos Nascimento. Revisão técnica: Jader Lugon Jr. Campos dos Goytacazes. Essentia Editora. 2012.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem Urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. 1 ed. Elsevier. Rio de Janeiro, 2016.

MOHID *Modelling Water Resources*. Disponível em: <www.mohid.com/> Acesso em: 14 set 2016.

PESSANHA, Cassius Marcelo Dutra. **Modelagem computacional aplicada à gestão sanitário-ambiental da lagoa imboassica-RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental modalidade profissional) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2012.

PLANO MACAÉ / OSTRAS. Disponível em: <
http://www.planomacaeostras.com/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=43>. Acesso em: 25 set 2016.

PRUSKI, F. A. Pinto. *et al.* **Estimativa e Espacialização dos Parâmetros da Equação de Intensidade Duração-Frequência da Precipitação para o Rio de Janeiro e o Espírito Santo** Engenharia Agrícola, v. 18, n. 3, p. 11-21. Jaboticabal, 1999.

RIBEIRO, G. **Acerca do cálculo da vazão de obras d'arte : tempo de concentração.** Revista do Clube de Engenharia, No. 294, pp 16-19. 1961.

SARTORI, A. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN.** Tese de Doutorado Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. UNICAMP. Campinas, SP. 237 pp, 2010.

SARTORI, A.; *et al.* **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.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. vol. 10 (4), p. 05-18, 2005.

SILVA-TAVARES, L. P.; SILVA, J. A. F.; LUGON JR., J. **Estudo de propostas de mitigação de cheias como subsídio ao plano de recursos hídricos da Região Hidrográfica VIII – RJ.** V Seminário Regional Sobre Gestão de Recursos Hídricos. Macaé. 2016.

TELLES, W. R.; SILVA NETO, A. J.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Avaliação do Sistema de Modelagem MOHID na delimitação de bacias hidrográficas.** Anais do Congresso de Modelagem Aplicada e Computacional. 2012.

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

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA.** In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia, GO. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. p. 1-8.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JR., F. W.; *et al.* **Modelagem Hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.13, n.5, p.581-590, 2009.

VIVIANI, E; MANZATO, G. **Geração de Modelos Digitais de Superfície por meio de Plataformas computacionais com estrutura vetorial e raster.** Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal). 15 (2): 27 - 34, 2005.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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