



inea instituto estadual
do ambiente



GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

**Secretaria Estadual do Ambiente - SEA
Instituto Estadual do Ambiente - INEA**

Petróleo Brasileiro S.A.

**Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Macaé e
das Ostras**

Contrato Nº 56/2011 - INEA

ELABORAÇÃO DO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ/OSTRAS

PRH-MACAÉ/OSTRAS

RELATÓRIO DO DIAGNÓSTICO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS (RD-04)

APÊNDICE

EDIÇÃO REVISADA

Consórcio MACAÉ/OSTRAS:



(SETEMBRO/2013)

QUADRO DE CODIFICAÇÃO DO DOCUMENTO

Código:	EG0143-R-PRH-RD-04-02-04			
Título do Documento:	RELATÓRIO DO DIAGNÓSTICO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS (RD-04) - APÊNDICE			
Aprovador:	Antônio Eduardo Leão Lanna			
Data da Aprovação:	16/09/2013			
Controle de Revisões				
Nº da Revisão	Natureza/Justificativa	Aprovação		
		Data	Responsável	Rubrica
01	Parecer cliente	08/03/2013	Lanna	AELL
02	Parecer Cliente	18/06/2013	Lanna	AELL
03	Parecer Cliente	29/08/2013	Lanna	AELL
04	Parecer Cliente	16/09/2013	Lanna	AELL

ÍNDICE

ELABORAÇÃO DO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ/OSTRAS PRH-MACAÉ/OSTRAS

RELATÓRIO DO DIAGNÓSTICO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS (RD-04)

APÊNDICE

ÍNDICE

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.1	Identificação do Contrato de Prestação de Serviços.....	2
1.2	Objetivos e Escopo dos Estudos e Planejamentos.....	2
1.3	Conteúdo do Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04) - Apêndice	4
2	ESTUDO DE CHEIAS PARA O PRH-MACAÉ/OSTRAS	6
2.1	Avaliação Preliminar das Cheias e Inundações na Bacia do Rio Macaé.....	6
2.1.1	Identificação das Causas de Enchentes	7
2.2	Estudos Anteriores sobre Cheias na Região	9
2.2.1	Estudo de Regionalização de Vazão da CPRM.....	9
2.2.2	Vazões Máximas Estimadas no Projeto FGV.....	10
2.2.3	Estudo de Modelagem do Estuário do Rio Macaé	10
2.3	Alternativas de Controle de Cheias Identificadas em Estudos Anteriores.....	11
2.3.1	Dragagem.....	11
2.3.2	Pôlder.....	11
2.3.3	Reservatório de Controle de Cheias	11
2.3.4	Outras Considerações sobre o Estudo de Cheias da FGV (2004)	13
2.4	Análise dos Dados dos Postos Fluviométricos	13
2.4.1	Determinação de Vazões Máximas de Vários Tempos de Recorrência em Postos Fluviométricos	15
2.5	Análise dos Dados de Modelagem Hidrológica.....	15
2.5.1	Vazões Máximas Calculadas nos Locais dos Postos Fluviométricos.....	15
2.5.2	Comparação das Estimativas de Vazões Máximas com o Estudo da FGV.....	18
2.5.3	Comparação das Estimativas de Vazões Máximas com o Estudo de Regionalização da CPRM.....	20
2.5.4	Considerações Finais sobre a Qualidade das Estimativas de Vazão Máxima usando o Modelo MGB-IPH	22
2.5.5	Vazões Máximas Estimadas por Modelagem Hidrológica em Pontos de Referência na Bacia do Rio Macaé.....	22
2.6	Controle de Cheias.....	26
2.6.1	Reservatório de Controle de Cheias no Rio São Pedro	26
2.6.2	Sistema de Alerta de Cheias	29
2.7	Considerações Finais	30
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

RELAÇÃO DE QUADROS E FIGURAS

RELAÇÃO DE QUADROS

Quadro 2.1: Distância da foz e cota estimada de alguns pontos de interesse ao longo do rio Macaé (cotas e distâncias aproximadas).	7
Quadro 2.2: Relação entre a vazão máxima para um dado tempo de retorno e a vazão média de cheia na região da bacia do rio Macaé, segundo CPRM (2002).	9
Quadro 2.3: Vazões máximas de projeto adotadas no estudo de alternativas de controle de cheias desenvolvido por FGV (2004), considerando diferentes tempos de retorno	10
Quadro 2.4: Relação cota, área, volume do reservatório de contenção de cheias (FGV, 2004).....	13
Quadro 2.5: Postos fluviométricos com dados de vazão na bacia do rio Macaé.	13
Quadro 2.6: Vazões máximas observadas nos postos fluviométricos na bacia do rio Macaé (valores em $m^3 \cdot s^{-1}$).	14
Quadro 2.7: Vazões máximas obtidas com base nas séries de vazões diárias calculadas com o modelo MGB-IPH nos locais correspondentes aos postos fluviométricos.....	16
Quadro 2.8: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados e observados no posto fluviométrico 5912000 (Macaé de Cima).....	17
Quadro 2.9: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados e observados no posto fluviométrico 59125000 (Galdinópolis).	18
Quadro 2.10: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados e observados no posto fluviométrico 59135000 (Piller).	18
Quadro 2.11: Comparação entre vazões máximas na foz do rio Macaé, estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).....	19
Quadro 2.12: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio Macaé, imediatamente a jusante da confluência com o rio São Pedro (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).	19
Quadro 2.13: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio Macaé, imediatamente a montante da confluência com o rio São Pedro (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).	19
Quadro 2.14: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio São Pedro, imediatamente a montante da confluência com o rio Macaé (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).	20
Quadro 2.15: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio Macaé, no local proposto para a construção da barragem de controle de cheias.	20
Quadro 2.16: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados pelo modelo MGB-IPH no posto fluviométrico 59125000 (Galdinópolis) e usando a equação de regionalização desenvolvida pela CPRM (2002).	21

Quadro 2.17: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados pelo modelo MGB-IPH no rio Macaé em São Romão (área de drenagem de 338 km ²) e usando a equação de regionalização desenvolvida pela CPRM (2002).....	21
Quadro 2.18: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados pelo modelo MGB-IPH no rio Macaé no local em que foi sugerida a construção de uma barragem de contenção de cheias pela FGV (2004), onde a área de drenagem é de 642 km ² , e usando a equação de regionalização desenvolvida pela CPRM (2002).....	21
Quadro 2.19: Vazões máximas estimadas a partir da modelagem hidrológica no período de 1950 a 2011 (nos pontos localizados na planície as vazões provavelmente estão superestimadas).....	24
Quadro 2.20: Vazões máximas específicas (m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²) estimadas a partir da modelagem hidrológica no período de 1950 a 2011 (nos pontos localizados na planície as vazões provavelmente estão superestimadas).....	24
Quadro 2.21: Vazões máximas do rio São Pedro, no local avaliado preliminarmente para a construção de uma barragem de controle de cheias, a partir de dados de vazão obtidos com o modelo MGB-IPH e considerando válida a distribuição de Gumbel.	26
Quadro 2.22: Estágios de alerta de chuvas e níveis de calha dos rios monitorados pelo INEA	29

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 2.1: Perfil longitudinal do rio Macaé, desde a foz até as proximidades das nascentes.	6
Figura 2.2: Parte da cidade de Macaé durante a cheia de 1998 (FGV, 2004).....	8
Figura 2.3: Mapa de localização do eixo da barragem da Ponte do Baião	12
Figura 2.4: Precipitação Média Anual	23
Figura 2.5: Localização dos pontos de interesse para os quais foram obtidos dados de vazões máximas estimadas a partir da modelagem hidrológica	25
Figura 2.6: Mapa de localização do eixo da barragem analisada no rio São Pedro.	27
Figura 2.7: Hidrograma hipotético considerado na análise do reservatório de contenção de cheias do rio São Pedro.	28
Figura 2.8: Simulação de controle de cheia hipotética no rio São Pedro.....	29

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este documento constitui-se na revisão do apêndice do Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04), cujo conteúdo abrange os estudos de cheias, contemplando os ajustes solicitados na complementação do Parecer da Fiscalização, enviado em 20/05/2013. Os estudos de sedimentos da RH VIII foram excluídos deste documento, pois aguardam o Parecer final da Fiscalização e a disponibilização de dados para a realização de estudos adicionais aos já realizados. Aprovados e concluídos os estudos, este relatório será re-editado e incorporado ao RD-04.

Apresentam-se, a seguir, as considerações a respeito do Contrato que orienta a execução do trabalho, do escopo e dos objetivos a serem alcançados, bem como sobre o conteúdo deste relatório, parte integrante dos serviços de Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras - PRH-MACAÉ/OSTRAS..

1.1 Identificação do Contrato de Prestação de Serviços

O presente “Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04)” - Apêndice decorre do Contrato nº. 56/2011, firmado entre o Instituto Estadual do Ambiente - INEA e o Consórcio Macaé/Ostras, com o objetivo da contratação de serviços especializados para a “Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras - PRH-Macaé/Ostras”.

Os principais dados e informações que permitem caracterizar o referido contrato de prestação de serviços de consultoria são os seguintes:

- Modalidade/Identificação da Licitação: Edital da Tomada de Preço nº. 03/2011-INEA;
- Processo Administrativo Nº: E-07/506.863/2010;
- Data da Licitação: 07 de julho de 2011;
- Identificação do Contrato Nº. 56/2011-INEA;
- Data da Assinatura do Contrato: 30 de novembro de 2011;
- Prazo de Execução do Trabalho: 18 meses;
- Data da Ordem de Serviço: 15 de dezembro de 2011;
- Data Prevista de Encerramento do Prazo Contratual: 06 de junho de 2013;
- Valor do Contrato: R\$ 1.399.963,47;
- Termo Aditivo INEA nº 40/2012: R\$ 28.457,33;
- Origem dos Recursos: Convênio INEA e Petróleo Brasileiro S.A.

Com base nas cláusulas e condições do referido Contrato, do Edital da Tomada de Preço nº 03/2011-INEA, dos Termos de Referência, bem como das propostas Técnica e de Preços da Contratada, desenvolvem-se os estudos e atividades que visam à elaboração do PRH-Macaé/Ostras, cujos resultados estarão expressos no conjunto dos relatórios técnicos e demais produtos estabelecidos.

1.2 Objetivos e Escopo dos Estudos e Planejamentos

O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (PRH-Macaé/Ostras) visa ao levantamento de informações e o posterior delineamento das intervenções relacionadas com a gestão ambiental da bacia de modo a promover a recuperação, conservação e o planejamento de uso dos recursos hídricos.

O Plano deverá avaliar a disponibilidade hídrica, o nível de qualidade de água na bacia, analisar as condições naturais para o equilíbrio do ecossistema e atendimento da necessidade de crescimento dos municípios, de manutenção da qualidade de vida das populações locais e da beleza paisagística da região, visando ao aprimoramento da gestão dos recursos hídricos da Região Hidrográfica e da implementação de seus instrumentos. Deverá ainda, fornecer subsídios ao Comitê que permitam definir as prioridades para as aplicações dos recursos financeiros em iniciativas para a manutenção e recuperação ambiental na região hidrográfica.

Pretende-se assim, com esse estudo, obter-se um diagnóstico da situação atual, um plano de recursos hídricos e o delineamento das intervenções necessárias para assegurar água em quantidade e qualidade necessária a seus usos múltiplos, especialmente, as relacionadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos e a restauração ambiental.

As atividades a serem desenvolvidas, necessárias para alcançar esses objetivos, estão reunidas em nove etapas, que compreendem as fases de diagnóstico, cenarização e elaboração do plano, que serão desenvolvidas de forma sucessiva, e as atividades de mobilização social, elaboração do Sistema de Informações Geográficas e apoio ao Comitê, que se desenvolverão ao longo de todo o contrato.

- Etapa 01: Atividades Preliminares e Consolidação do Plano de Trabalho;
- Etapa 02: Diagnóstico da Situação Atual da Região Hidrográfica;
- Etapa 03: Elaboração de Cenários Estratégicos de Planejamento em Recursos Hídricos;
- Etapa 04: Proposição de Programas, Projetos e Estratégias de Ação;
- Etapa 05: Consolidação do Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas;
- Etapa 06: Mobilização Social;
- Etapa 07: Construção e Implementação do Sistema de Informações Geográficas - SIG;
- Etapa 08: Apoio Técnico ao CBH Macaé e das Ostras;
- Etapa 09: Produção e Impressão do Material para Divulgação.

Para o desenvolvimento das etapas do trabalho foram detalhadas macroatividades e atividades a serem realizadas, de forma a serem alcançados os objetivos gerais e específicos do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras, nos prazos estipulados e com a qualidade técnica almejada pela Consultora, pelo INEA e pelo CBH Macaé e das Ostras ao promover a elaboração do PRH-Macaé/Ostras.

As principais etapas que configuram o trabalho e seu conteúdo estão descritas abaixo:

- Diagnóstico da situação atual, que contempla a realização de amplo diagnóstico multidisciplinar regional, com ênfase no levantamento e avaliação integrada das restrições e das potencialidades dos recursos hídricos, associadas às demandas pela água para os diversos usos, culminando no balanço hídrico da situação atual das bacias hidrográficas. Envolve a articulação de diferentes áreas do conhecimento relacionadas à disponibilidade, qualidade e usos múltiplos da água, incluindo o conhecimento da dinâmica social e da organização do território;
- Formulação de Cenários Estratégicos de Planejamento, voltados para os usos adequados dos recursos hídricos, envolvendo distintos horizontes de planejamento, que contemplem situações tendenciais, factível e otimista, para embasar o cenário normativo que integrará o plano;
- Proposição de Programas, Projetos e Estratégias de Ação, que consiste na análise e na seleção das alternativas de intervenção e gestão, visando à compatibilização de disponibilidades hídricas quanti-qualitativas frente às demandas, articulando os diversos interesses de usos dos recursos hídricos, internos e externos à bacia. Através da participação social e da aplicação de modelos específicos devem ser identificados as ações que configuram o cenário normativo a ser alcançado; e
- Consolidação do Plano de Recursos Hídricos, fruto de um processo de planejamento participativo, contemplando objetivos, metas e ações, traduzidas em programas e planejamentos a serem periodicamente reavaliados, abrangendo também as recomendações para implementação dos demais instrumentos de gestão das águas previstas na legislação estadual e federal pertinentes e, ainda, os aspectos relativos à organização social e institucional voltados para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Outras etapas complementares, porém não menos importantes, são: a Consolidação do Plano de Trabalho, a Mobilização Social, o SIG, o Apoio ao CBH Macaé e das Ostras, bem como a Produção do Material Técnico e de Divulgação.

1.3 Conteúdo do Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04) - Apêndice

O Relatório do Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-04) - Apêndice insere-se no escopo dos serviços de elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras (PRH-Macaé/Ostras), cujo objetivo é apresentar a revisão do estudo de cheias da RH VIII, de forma a complementar o diagnóstico apresentado no RD-04.

Apresenta-se o estudo de cheias, revisado com base no Parecer enviado ao Consórcio em 20/05/2013, contemplando a revisão dos principais estudos anteriores e um estudo de vazões máximas, informações que subsidiarão a elaboração do Plano de Recursos Hídricos.

2 ESTUDO DE CHEIAS PARA O PRH-MACAÉ/OSTRAS

2 ESTUDO DE CHEIAS PARA O PRH-MACAÉ/OSTRAS

Este texto apresenta um estudo de vazões máximas na bacia do rio Macaé, que servirá de subsídio à elaboração do plano de bacia.

Realiza-se, inicialmente, uma avaliação qualitativa da formação das cheias na bacia do rio Macaé. A seguir, são considerados os dados dos postos fluviométricos existentes na bacia, identificando eventos de vazões máximas em cada ano e relacionando a magnitude das vazões máximas com o tempo de retorno. Finalmente, são explorados os resultados de modelagem hidrológica chuva-vazão, permitindo estimar, de forma preliminar, vazões máximas em locais sem monitoramento.

Apresenta-se também uma revisão de relatórios de trabalhos anteriores, com foco sobre o tema da formação e controle de cheias na bacia do Macaé, destacando as alternativas identificadas, propostas ou analisadas de controle desses eventos.

2.1 Avaliação Preliminar das Cheias e Inundações na Bacia do Rio Macaé

A bacia do rio Macaé se caracteriza por uma grande diferença de altitude entre a parte alta e a parte baixa da bacia. A distribuição espacial das chuvas é muito influenciada pela orografia, apresentando valores maiores de precipitação média anual nas partes mais altas da bacia.

A declividade do rio principal, apresentada na Figura 2.1, apresenta dois trechos bastante distintos, divididos pelo Cachoeiro do Macaé, localizado cerca de 65 km a montante da foz. Analisando de jusante para montante, o primeiro trecho se estende desde a foz do rio Macaé até o Cachoeiro do Macaé, e apresenta baixa declividade e o segundo trecho se estende do Cachoeiro do Macaé até as nascentes, e apresenta alta declividade.

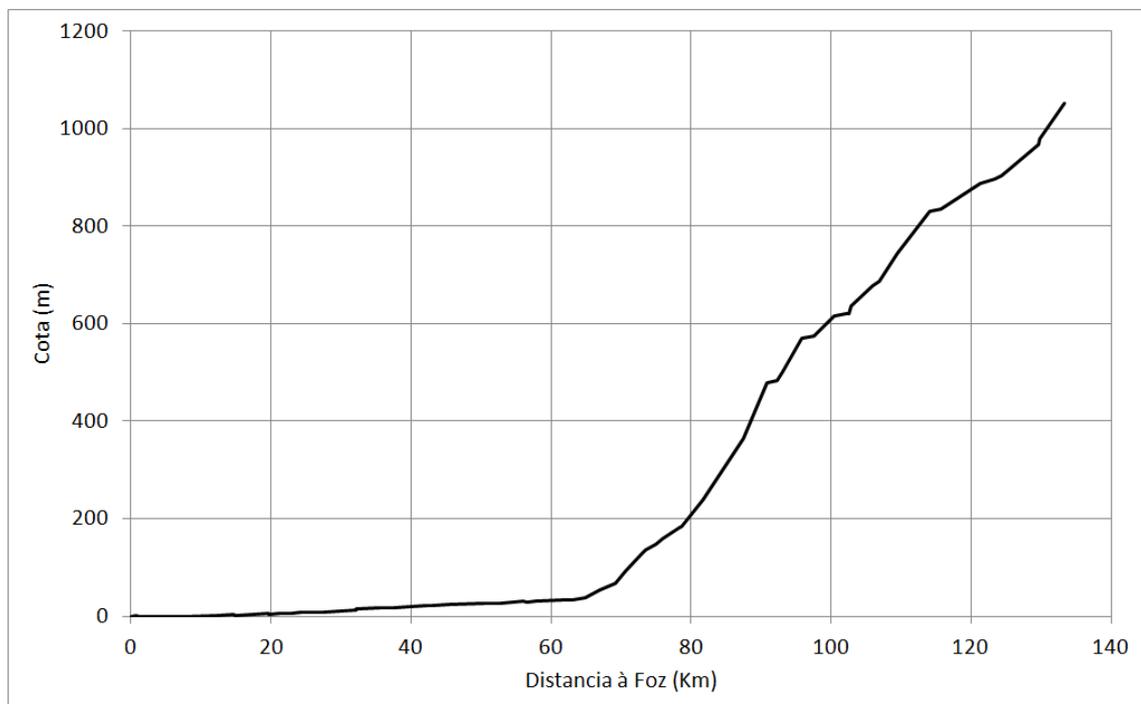


Figura 2.1: Perfil longitudinal do rio Macaé, desde a foz até as proximidades das nascentes.

A declividade do rio Macaé na parte alta da bacia, até o Cachoeiro de Macaé, é da ordem de 10 m.km^{-1} ou mais. Até este local o fundo do rio é predominantemente rochoso. A partir do Cachoeiro do Macaé para jusante, a declividade do rio é inferior a 1 m.km^{-1} , e o leito do rio é predominantemente arenoso.

Quadro 2.1: Distância da foz e cota estimada de alguns pontos de interesse ao longo do rio Macaé (cotas e distâncias aproximadas).

Local	Distância à foz (km)	Cota (m)
Foz	0,0	0
Confluência Rio D´Anta	40,7	26
Local proposto barragem do Macaé	49,6	33
Rochas no Cachoeiro de Macaé	64,5	47
Lugarejo jusante Barra do Sana	72,6	149
Ponte	82,4	294
Confluência rio Bonito	94,9	565

As cheias são formadas por chuvas intensas que ocorrem na parte alta da bacia, gerando escoamento nas regiões de maior declividade, e com solos relativamente rasos. O escoamento atinge o rio Macaé e seus afluentes, e se propaga rapidamente, em função da alta declividade do leito dos rios.

Na parte alta da bacia os cursos d´água são bastante encaixados e, com o aumento da vazão, ocorre um aumento da velocidade da água. Nesta região o rio recebe a contribuição de um grande número de afluentes, que concorre fortemente para a formação das cheias.

Ao atingir a parte baixa da bacia, a declividade do rio diminui, e a velocidade da água também é reduzida. Nesta região o rio percorre uma planície e, durante as cheias, inunda grandes áreas adjacentes ao leito. Assim, a onda de cheia é naturalmente atenuada, porque parte da água não segue imediatamente para jusante, mas se espalha lateralmente pela planície.

O principal afluente do rio Macaé na parte baixa da bacia é o rio São Pedro, que apresenta um perfil longitudinal semelhante ao do rio Macaé.

Portanto, no que se refere às cheias, tanto a bacia do rio Macaé como a bacia do rio São Pedro podem ser divididas em duas zonas: uma zona de formação das cheias e uma zona de dissipação ou inundação. A zona de formação das cheias corresponde à parte alta das bacias. A zona de inundação corresponde à parte baixa.

A jusante da localidade conhecida como Ponte do Baião, e a jusante da confluência do rio Macaé com o Córrego Dantas, o leito do rio Macaé foi retificado por obras do DNOS realizadas a partir do final da década de 1960, tendo por objetivo a drenagem da planície, diminuindo a extensão espacial e temporal da inundação. Da mesma forma, o rio São Pedro e outros afluentes tiveram o seu leito retificado.

2.1.1 Identificação das Causas de Enchentes

As enchentes no rio Macaé são causadas por chuvas intensas, com duração de algumas horas até 1 ou dois dias, concentradas principalmente na parte alta da bacia. A vazão segue pelos cursos de água da parte alta da bacia, de forma muito rápida por causa da declividade. A forma dos vales na parte alta da bacia não permite que grandes áreas sejam inundadas, o que impede a atenuação das cheias. Desta forma, as cheias atingem a parte baixa da bacia apenas pouco tempo após a ocorrência da chuva.

Na parte baixa da bacia, o rio Macaé e seus afluentes têm uma declividade baixa. A capacidade de condução de vazão da calha do rio é menor, e quando o rio extravasa a área inundada é grande, em função das características topográficas da região.

A maior parte da planície inundada é ocupada por fazendas e atividades agropecuárias, especialmente a criação de gado. Apenas o extremo de jusante do rio Macaé, próximo à foz, apresenta ocupação urbana ao longo de cerca de 5 km do novo leito retificado do rio. Neste trecho, o rio Macaé apresenta alguns canais laterais, além da presença do antigo leito do rio. Durante as cheias, o nível da água nestes canais laterais, como o canal Jurumirim, também se eleva, em função da própria elevação do nível da água no rio Macaé, além da chuva local. As moradias existentes ao longo destes canais eventualmente sofrem com as cheias maiores.

A retificação do rio, realizada a partir da década de 1960, procurou aumentar a capacidade de vazão dos rios na planície, especialmente do rio Macaé, que teve seu curso alterado em uma extensão de quase 40 km. O provável efeito da retificação foi, inicialmente, uma redução da frequência e intensidade das inundações no início do trecho retificado, entre a Ponte do Baião e a confluência com o rio São Pedro. Ao mesmo tempo, a retificação acelerou a chegada da onda de cheia até a cidade de Macaé e com menor amortecimento, e, possivelmente, contribuiu para aumentar a frequência e intensidade das inundações junto à área urbana.

A Figura 2.2 (reproduzida de FGV, 2004) apresenta uma situação de cheia no rio Macaé, com destaque para o bairro Malvinas ao centro, o Canal Virgem Santa à esquerda, e a região da foz do canal do Capote na parte inferior. A imagem também mostra ao fundo uma grande área de planície inundada em uma região não urbanizada.



Figura 2.2: Parte da cidade de Macaé durante a cheia de 1998 (FGV, 2004).

A retificação do rio Macaé também exige que sejam realizadas operações de manutenção, com retirada de sedimentos do leito. Este tipo de manutenção nem sempre é realizado, e, inevitavelmente, os sedimentos trazidos da área de maior declividade acabam se depositando no leito do rio na região da planície. Aos poucos estes sedimentos formam bancos de areia que diminuem a capacidade de vazão do rio, sendo outro fator que se agrega para promover o aumento da frequência e intensidade das inundações. Outro

processo que pode ocorrer por falta de manutenção do trecho retificado é a erosão das margens, fazendo com que o rio retome sua forma em planta original, mais sinuosa do que a forma atual do leito retificado.

No trecho final do rio Macaé, o controle exercido pelo nível do mar também afeta as cheias. Uma mesma vazão do rio pode corresponder a um nível mais ou menos elevado, dependendo da condição de maré ser mais ou menos elevada.

2.2 Estudos Anteriores sobre Cheias na Região

Foram identificados três estudos anteriores, relativamente recentes, sobre cheias na região da bacia do rio Macaé. O primeiro é um estudo de regionalização de vazão realizado pela CPRM, que apresenta algumas estimativas de vazões máximas, médias e mínimas (CPRM, 2002). O segundo estudo sobre cheias na região foi realizado pela FGV, através de um convênio entre SEMADUR e SERLA com a UTE Norte Fluminense (FGV, 2004). O terceiro estudo é uma dissertação de mestrado desenvolvida na COPPE/UFRJ que trata do escoamento do rio Macaé na região da Foz, e demonstra o forte efeito da Maré na região que é afetada pelas cheias (AMARAL, 2003).

2.2.1 Estudo de Regionalização de Vazão da CPRM

Um estudo de regionalização de vazão da bacia 59 (segundo divisão de bacias da Agência Nacional de Águas - ANA) foi desenvolvido pela CPRM e está disponível na internet sob o título: Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 59 (CPRM, 2002). Neste estudo de regionalização foi utilizada a metodologia descrita em Tucci (1998) para a estimativa de vazões máximas, mínimas e médias a partir de características físicas das bacias hidrográficas. Foram utilizados dados de 13 postos fluviométricos na região 59, que inclui os rios Macaé, São João, Macabu e outros. Os postos fluviométricos utilizados apresentavam áreas de drenagem na faixa entre 22 e 597 km².

O trabalho sugere uma equação de regionalização de vazão média de cheia dada por:

$$Q_{mc} = 0,3865.A^{1,0259}$$

Onde: A é a área de drenagem em km², e

Q_{mc} é a vazão média de cheia em m³.s⁻¹.

De acordo com CPRM (2002) esta equação não deveria ser utilizada em locais com áreas de drenagem inferiores a 22 km², nem em locais com áreas de drenagem superiores a 597 km².

Para obter as vazões máximas associadas a um determinado tempo de retorno a partir da vazão média de cheia, o trabalho sugere a utilização de fatores multiplicativos de acordo com uma curva regional de probabilidades de vazão máxima anual. Alguns valores desta curva regional são apresentados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Relação entre a vazão máxima para um dado tempo de retorno e a vazão média de cheia na região da bacia do rio Macaé, segundo CPRM (2002).

TR (anos)	2	5	10	25	50	100
Q/Q _{mc}	0,9119	1,3487	1,6644	2,093	2,4332	2,789

Com base neste estudo de regionalização, a vazão máxima de 10 anos de tempo de retorno em um local com área de drenagem de 100 km² seria obtida multiplicando o fator 1,6644 pelo valor de Q_{mc} obtido da equação acima, o que resultaria em 72,5 m³.s⁻¹.

Infelizmente, a equação de regionalização obtida no estudo da CPRM (2002) não permite estimar a vazão máxima do rio Macaé na região em que ocorrem os maiores problemas, isto é, no trecho próximo à cidade de Macaé, porque a área de drenagem neste trecho é consideravelmente maior (1.714 km²) do que o limite de aplicabilidade sugerido (597 km²).

2.2.2 Vazões Máximas Estimadas no Projeto FGV

No projeto de identificação de alternativas de controle de cheias foram considerados cenários de vazões máximas obtidos pela HICON Engenharia Ltda. em diversos locais na bacia. O Quadro 2.3 reproduz os valores de vazão máxima adotados no estudo.

Adicionalmente, o estudo estimou as vazões máximas e os hidrogramas de projeto no local em que sugeria a construção de uma barragem de contenção de cheias no rio Macaé, a montante da ponte do Baião. Estas estimativas foram obtidas aplicando o método do Hidrograma Unitário Triangular, desenvolvido pelo U.S. Soil Conservation Service (SCS), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Estas vazões máximas também são apresentadas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3: Vazões máximas de projeto adotadas no estudo de alternativas de controle de cheias desenvolvido por FGV (2004), considerando diferentes tempos de retorno

Rio	Local	Vazão máxima de projeto ($m^3.s^{-1}$)				
		2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Jurumirim	Foz	26	40	48	57	ND
São Pedro	Foz	107	160	195	229	ND
Macaé	BR 101	196	293	357	418	ND
Macaé	Montante do rio São Pedro	199	298	363	426	ND
Macaé	Jusante do rio São Pedro	271	406	495	580	ND
Macaé	Montante Jurumirim	284	425	519	608	ND
Macaé	Foz	309	462	563	661	ND
Macaé	Local da barragem proposta	ND	ND	ND	297	397

2.2.3 Estudo de Modelagem do Estuário do Rio Macaé

O escoamento do trecho final do rio Macaé, localizado entre a região da ponte da BR-101 e a sua foz, foi analisado detalhadamente em Amaral (2003). Neste trabalho foi utilizado o modelo SISBAHIA (Rosman, 2001) para simular o escoamento no trecho inferior do rio Macaé, sujeito à variação de nível do mar. O objetivo principal foi analisar a entrada de água salgada no rio Macaé na região de sua foz, e o alcance para montante de águas com alta concentração de salinidade.

Um dos cenários analisados por Amaral (2003) foi denominado "cheia", em que foi adotada uma vazão de aproximadamente $45,5 m^3.s^{-1}$ afluindo pelo rio Macaé, a montante da confluência com o rio São Pedro, e uma vazão de $37 m^3.s^{-1}$ afluindo pelo rio São Pedro. No cenário 2, em que a situação de vazão de "cheia" é combinada com o efeito da maré de sizígia (marés de sizígia são as que ocorrem nas luas nova e cheia, quando os efeitos lunares e solares reforçam uns aos outros, produzindo as maiores marés altas e as menores marés baixas) os resultados da modelagem mostram que o nível da água do rio Macaé junto à área urbana do município de Macaé apresenta variações entre $-0,6 m$ e $+ 0,9 m$.

Amaral (2003) também analisou o efeito provocado por uma maré meteorológica (ressaca) sobreposta à maré de sizígia. Neste cenário, os níveis da água máximos atingem aproximadamente 1,2 metros no trecho do rio Macaé junto à área urbana. Em outras

palavras, uma maré meteorológica pode aumentar os níveis do rio Macaé de 0,9 para 1,2 metros (diferença de 30 cm) no trecho do rio próximo à zona urbana do município.

Os resultados de Amaral (2003) demonstram a forte influência da maré na região da foz do rio Macaé que não pode ser desprezado em estudos de cheias neste rio.

2.3 Alternativas de Controle de Cheias Identificadas em Estudos Anteriores

Um estudo de cheias realizado há quase 10 anos (FGV, 2004) identificou os principais problemas de enchentes na cidade de Macaé e analisou algumas alternativas para o seu controle: a dragagem do leito no trecho final do rio; a construção de diques em torno das áreas baixas habitadas, formando um polder; e a construção de uma barragem, com a formação de um reservatório de controle de cheias.

Cada uma destas alternativas foi analisada através de modelagem matemática, utilizando um modelo capaz de representar o escoamento no rio e o processo de inundação das planícies marginais, denominado Modelo de Células (Miguez e Mascarenhas, 1999). Este modelo, utilizado no estudo da FGV, 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.

O objetivo da sua aplicação foi a obtenção dos níveis da água junto à zona urbana em diferentes cenários hidrológicos e em diferentes cenários de intervenção, incluindo a dragagem, o reservatório de controle de cheias e o polder.

2.3.1 Dragagem

O estudo da FGV analisou o efeito da dragagem do trecho final do rio Macaé, entre a foz e a confluência com o canal Jurumirim, numa extensão de 4.630 metros. Considerou-se que a dragagem seria executada aprofundando o leito até a cota -4,0 metros em todo este trecho. 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.

2.3.2 Polder

No estudo foram também analisadas alternativas para controle da macrodrenagem do polder Nova Malvinas. Esta alternativa de controle não tem efeito direto sobre os níveis de cheia do rio Macaé. Segundo o estudo, o polder de Nova Malvinas, dotado de um sistema de drenagem com bombeamento e, desejavelmente, com áreas de reservação de água interna, teria bons resultados no controle de cheias local.

2.3.3 Reservatório de Controle de Cheias

O estudo da FGV analisou também o efeito de um reservatório de contenção de cheias a ser construído no rio Macaé, cerca de 6 km a montante da Ponte do Baião. Este reservatório teria uma área inundada máxima de cerca de 8,4 km², atingindo um volume máximo de 88 milhões de m³. A barragem seria provida de um vertedouro de 80 metros de comprimento, cuja soleira estaria na cota 25 m. Também seria provida de um descarregador de fundo.

O Quadro 2.4 apresenta a relação entre cota, área inundada e volume do reservatório proposto e a Figura 2.3, a localização do eixo da barragem.

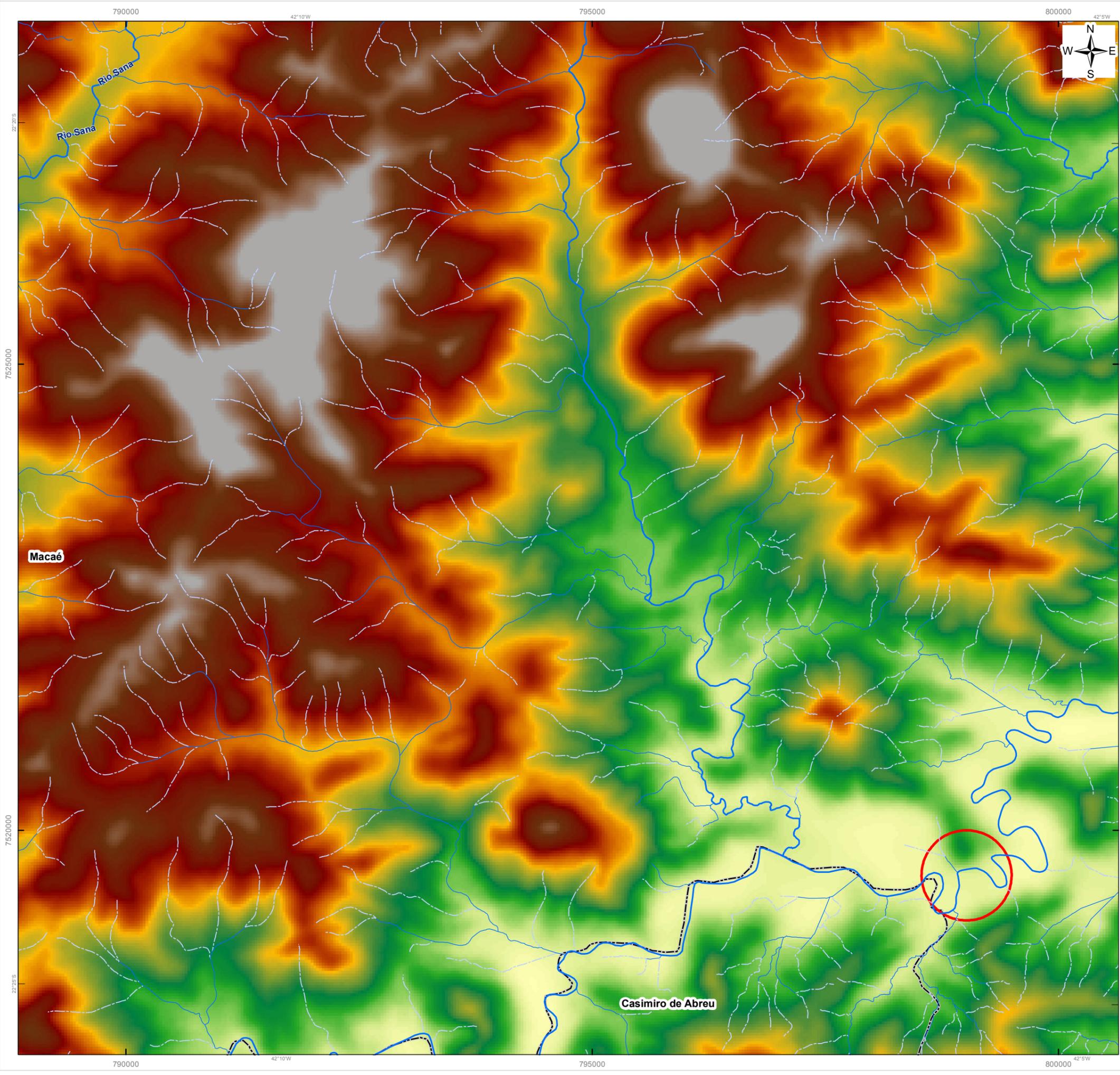


Figura 2.3 Mapa de Localização do Eixo da Barragem da Ponte do Baião

Legenda

- Sede dos Municípios
- ▬ Hidrografia Principal
- ▬ Hidrografia Secundária
- ▬ Canal
- Barragem Ponte do Baião
- ☁ Corpo Hídrico
- ▭ Limite Municipal

Altimetria (m)
 Value High : 1325,6
 Low : -14,469

Referências Cartográficas:

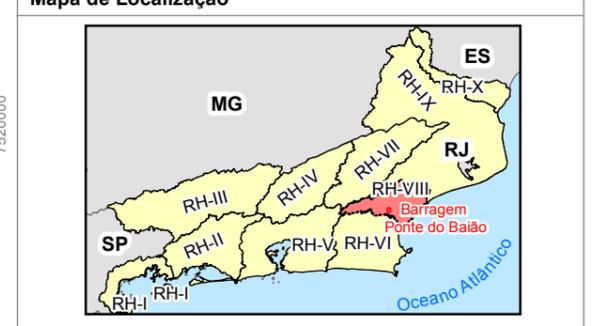
- Altimetria: modelo digital de elevação gerado a partir da base cartográfica altimétrica na escala 1: 50.000 (IBGE/SEA) - disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/ GEOPEA, 2012;
- Hidrografia: Ortofotos Digitais IBGE/SEA - 2005/2006, escala 1:25.000 disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Limites Municipais: escala 1:450.000 Estado do Ambiente - RJ, 2010;

Escala numérica em A3: 1:40.000

Escala Gráfica:

Informações Cartográficas:

Sistema de Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Meridiano Central: -45
 Fuso: 23S
 Datum: SIRGAS 2000



Projeto

PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS

Consórcio MACAÉ OSTRAS:

Quadro 2.4: Relação cota, área, volume do reservatório de contenção de cheias (FGV, 2004).

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (m ³)
18	0	0
19	6,96	2,32
20	7,76	9,67
30	8,38	88,02

De acordo com FGV (2004) este reservatório seria capaz de atenuar a vazão máxima no local da barragem de 297 para 47,6 m³.s⁻¹, no caso da cheia de 20 anos de tempo de retorno. No caso da cheia de 50 anos de tempo de retorno a atenuação seria de 397 para 163 m³.s⁻¹.

Entretanto, o estudo alerta para o fato que o reservatório 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. Como recomendação, propôs um estudo de implantação de uma barragem no rio São Pedro, para atuar em conjunto com a barragem do rio Macaé.

2.3.4 Outras Considerações sobre o Estudo de Cheias da FGV (2004)

Além dos aspectos descritos até aqui, o estudo da FGV apresenta outras conclusões importantes sobre o comportamento das cheias no trecho inferior do rio Macaé. De acordo com ele, a combinação ideal de medidas de controle seria a dragagem do trecho final do rio Macaé com a construção do reservatório de controle de cheias. Porém, mesmo com estas intervenções, algumas áreas não seriam relevantemente beneficiadas, como é o caso daquelas próximas ao canal Virgem Santa.

Além disso, o estudo chamou atenção para os problemas de drenagem nas áreas protegidas por diques, onde seria necessário prever no ordenamento territorial urbano áreas de reserva de água durante as chuvas intensas localizadas. Este ordenamento territorial urbano também seria importante para impedir que áreas de baixada, passíveis de inundação frequente, sejam ocupadas.

Um aspecto importante do estudo é que diques em áreas rurais, ao longo do rio Macaé e de seus afluentes, a montante da cidade de Macaé, provocarão um aumento nos níveis de alagamento da cidade de Macaé e, por este motivo, sua construção deve ser evitada.

2.4 Análise dos Dados dos Postos Fluviométricos

O Quadro 2.5 apresenta os postos fluviométricos na bacia do rio Macaé (bacia 59 de acordo com a codificação adotada pela ANA) existentes no banco de dados Hidroweb. Estes postos fluviométricos estão todos localizados na parte alta da bacia, em locais cuja área de drenagem é muito pequena, comparada com a área de drenagem em que ocorrem os principais problemas de inundação. Entretanto, a análise das vazões máximas nestes locais permite avaliar as incertezas nas estimativas de vazões máximas a partir da modelagem hidrológica, descrita no item seguinte.

Quadro 2.5: Postos fluviométricos com dados de vazão na bacia do rio Macaé.

Código	Nome	Lat.	Long.	Ativo	Resp.	Oper.	Rio	Município	Área (km ²)
59125000	Galdinópolis	-22,3689	-42,3792	Sim	ANA	CPRM	Rio Macaé	Nova Friburgo	104
59120000	Macaé de Cima	-22,3722	-42,4622	Sim	ANA	CPRM	Rio Macaé de Cima	Nova Friburgo	67
59135000	Piller	-22,4092	-42,3361	Sim	ANA	CPRM	rio Bonito	Nova Friburgo	71

Os dados dos postos fluviométricos apresentados no quadro anterior foram analisados, buscando identificar os picos de vazões a cada ano. Os valores máximos de cada ano hidrológico, definido como o período que inicia em julho de um ano e segue até junho do ano seguinte, estão apresentados no Quadro 2.6.

Quadro 2.6: Vazões máximas observadas nos postos fluviométricos na bacia do rio Macaé (valores em $m^3.s^{-1}$).

Ano	Macaé de Cima (59120000)	Galdinópolis (59125000)	Piller (59135000)
1951		104,0	53,0
1952		52,5	25,4
1953		30,5	29,7
1954		61,0	33,4
1955		32,9	19,5
1956		64,0	36,7
1957		48,1	26,7
1958		49,7	37,1
1959		23,2	17,8
1960		42,5	46,6
1961		42,5	32,7
1962		28,1	15,7
1963		41,2	21,5
1964		36,8	55,0
1965			57,5
1966		54,0	66,0
1967		52,5	58,5
1968	16,9	26,2	20,4
1969	45,7	53,5	23,9
1970			
1971	22,5		
1972	25,7	26,9	18,5
1973	44,6	28,2	15,7
1974	26,6	19,4	13,5
1975	28,4	13,1	10,7
1976	18,9	35,3	15,3
1977	32,7	64,8	13,3
1978	41,9	44,6	35,4
1979	17,2	33,1	28,6
1980	49,8	56,8	17,1
1981		45,1	23,0
1982	18,9	25,6	15,3
1983	13,1	18,7	20,4
1984	41,2	26,9	20,4
1985	12,9	30,2	20,6
1986	18,6	22,7	21,2
1987	35,7	24,7	10,5
1988	22,8	18,9	23,9
1989	39,3	32,7	21,0
1990		50,8	20,4
1991	10,8	20,2	15,6
1992	30,9	43,7	20,4
1993	11,4	42,0	25,0
1994	9,0	49,9	7,8
1995	10,2	9,3	11,5
1996	12,1	36,4	20,0
1997	11,6	22,1	
1998	21,5	14,2	9,5
1999	26,3	44,6	12,6
2000	18,5	26,4	15,2
2001	14,2	18,0	11,7
2002	16,5	35,0	15,3
2003	32,6	44,4	42,2
2004	37,0	38,5	30,5
2005	28,5	27,9	22,5
2006	27,1	41,7	22,0
2007	20,8	25,9	21,2
2008	72,4		
2009		44,0	

Posteriormente foi realizada uma análise estatística de vazões máximas, considerando válida a distribuição de Gumbel, também chamada de Distribuição Assintótica dos Extremos Tipo I. Os resultados estão apresentados no próximo item, juntamente com os de modelagem.

2.4.1 Determinação de Vazões Máximas de Vários Tempos de Recorrência em Postos Fluviométricos

Os dados dos postos fluviométricos apresentados no quadro anterior foram analisados, buscando identificar os picos de vazões a cada ano. Posteriormente foi realizada uma análise estatística de vazões máximas, considerando válida a distribuição de Gumbel, também chamada como Distribuição Assintótica dos Extremos Tipo I, usualmente adotada para extremos máximos. Os resultados estão apresentados no próximo item, juntamente com os de modelagem.

2.5 Análise dos Dados de Modelagem Hidrológica

O modelo hidrológico MGB-IPH foi aplicado na bacia na fase de determinação das disponibilidades hídricas apresentadas no relatório específico, no período de 1950 a 2011. O modelo foi calibrado dando ênfase às vazões mínimas, tendo em vista a necessidade de estimar as disponibilidades hídricas nos diferentes pontos da bacia. Destarte, nesta análise sobre as cheias na bacia, os resultados do modelo hidrológico em termos de vazões máximas foram aproveitados, permitindo estimar a magnitude e frequência das cheias em vários pontos da bacia.

Para a estimativa de vazões máximas com base nas simulações com o modelo MGB-IPH foi adotado um procedimento semelhante ao normalmente utilizado com dados observados. Em cada local com resultados calculados pelo modelo (todas as minibacias identificadas no relatório de modelagem hidrológica apresentada no relatório EG0143-R-PRH-RD-04-01-04) a série de vazão em intervalo de tempo diário foi analisada, identificando o valor máximo de cada ano hidrológico. Admitiu-se um ano hidrológico de vazões máximas iniciando em julho e terminando em junho, de forma a garantir a independência entre os valores sucessivos. A partir daí, a sequência de valores máximos anuais foi analisada considerando válida a distribuição de Gumbel, e os valores máximos para diferentes tempos de retorno foram obtidos.

Esta metodologia permitiu obter vazões máximas em diversos pontos da bacia de uma forma coerente do ponto de vista espacial, e teve a vantagem de estar baseada em resultados de um modelo calibrado, ao contrário do que normalmente ocorre quando se utiliza estimativas baseadas no hidrograma unitário e na separação de escoamento usando o parâmetro CN do SCS. Além disso, esta metodologia é menos subjetiva no que se refere à definição da chuva de projeto e das condições antecedentes de umidade da bacia, já que a série de chuvas observadas é utilizada como dado de entrada (Boughton e Droop, 2003; Cameron et al., 1999).

É importante destacar, entretanto, que, em função da utilização de um modelo hidrológico com passo de tempo diário, os valores obtidos devem ser encarados com cautela em bacias menores, onde o tempo de concentração é inferior a um dia.

Para avaliar as estimativas de vazões máximas obtidas a partir da análise estatística das vazões calculadas, foram realizadas comparações com as vazões máximas obtidas por três outros métodos: análise estatística das vazões observadas nos postos fluviométricos; simulação hidrológica por eventos (FGV, 2004); e regionalização de vazões (CPRM, 2002).

2.5.1 Vazões Máximas Calculadas nos Locais dos Postos Fluviométricos

Inicialmente, a qualidade da estimativa das vazões máximas baseadas no modelo hidrológico MGB-IPH foi avaliada através da comparação de vazões máximas nos postos fluviométricos. As vazões máximas calculadas com base no modelo hidrológico em cada ano no período de 1951 a 2011 são apresentadas no Quadro 2.7.

Quadro 2.7: Vazões máximas obtidas com base nas séries de vazões diárias calculadas com o modelo MGB-IPH nos locais correspondentes aos postos fluviométricos.

Ano	Macaé de Cima (59120000)	Galdinópolis (59125000)	Piller (59135000)
1951	16,4	31,4	31,8
1952	15,3	30,5	24,2
1953	8,6	14,3	11,0
1954	12,3	28,9	19,7
1955	15,7	29,2	22,5
1956	11,7	17,4	20,9
1957	22,0	38,0	30,5
1958	18,6	43,0	42,2
1959	12,0	21,8	25,3
1960	10,6	17,9	12,3
1961	33,9	63,3	38,9
1962	13,2	45,5	44,6
1963	7,1	12,9	12,2
1964	14,7	22,6	14,1
1965	16,0	31,5	30,7
1966	55,7	91,5	55,6
1967	18,1	30,2	33,8
1968	32,8	40,4	20,4
1969	30,7	49,6	19,3
1970	14,8	18,3	9,4
1971	29,9	43,4	58,5
1972	34,9	48,0	22,1
1973	32,4	44,1	27,8
1974	14,9	17,7	15,0
1975	26,4	32,4	11,9
1976	16,6	20,2	10,5
1977	48,9	67,4	38,2
1978	49,2	75,6	37,0
1979	51,9	94,4	46,9
1980	18,9	22,7	23,5
1981	25,5	32,6	15,0
1982	32,5	41,4	33,9
1983	17,9	24,2	14,9
1984	16,7	21,2	12,1
1985	61,1	71,5	20,6
1986	40,5	47,9	18,0
1987	28,9	45,2	18,3
1988	13,8	19,3	13,5
1989	25,4	32,8	13,8
1990	45,7	61,4	32,6
1991	62,8	98,3	54,0
1992	27,4	39,7	12,4
1993	19,6	24,9	13,6
1994	34,5	57,6	48,0
1995	29,7	35,9	20,3
1996	14,9	19,5	11,2
1997	43,1	62,9	23,6
1998	38,9	61,7	39,4

Ano	Macaé de Cima (59120000)	Galdinópolis (59125000)	Piller (59135000)
1999	16,4	20,9	10,1
2000	31,2	56,0	19,6
2001	25,9	31,8	14,1
2002	16,3	21,2	9,2
2003	31,6	49,5	23,5
2004	37,0	40,5	34,2
2005	29,8	46,5	33,0
2006	24,2	31,2	26,2
2007	38,1	50,2	27,8
2008	11,1	16,3	13,0
2009	109,6	147,1	134,1
2010	41,8	51,3	31,8
2011	20,5	40,7	16,5

As vazões máximas anuais foram analisadas considerando válida a distribuição de probabilidade de Gumbel. A vazão para um dado tempo de retorno TR (em anos) pode ser obtida pela equação que segue (Naghetini e Pinto, 2007):

$$Q = Q_M - s \cdot \left\{ 0,45 + 0,7797 \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR-1} \right) \right] \right\}$$

Onde, Q é o valor da vazão máxima desejada; TR é o tempo de retorno em anos; s é o desvio padrão das vazões máximas anuais e Q_M é a média das vazões máximas anuais.

O Quadro 2.8 apresenta os resultados das vazões máximas baseadas em dados observados no posto fluviométrico 59120000 (Macaé de Cima) e as vazões máximas estimadas com base nos hidrogramas calculados com o modelo MGB-IPH neste mesmo local. Nos dois casos foi considerada a distribuição de Gumbel. Observa-se que as diferenças entre as vazões máximas observadas e calculadas são relativamente pequenas na faixa de vazões com tempo de retorno mais baixo, aumentando para tempos de retorno mais altos, atingindo uma diferença máxima de 20% no caso da cheia de TR=50 anos, o que pode ser considerado aceitável ante as incertezas envolvidas.

Quadro 2.8: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados e observados no posto fluviométrico 5912000 (Macaé de Cima).

TR	Calculado	Observado	Diferença
2	25	24	4%
5	40	36	11%
10	50	44	14%
20	60	51	18%
50	73	61	20%

O Quadro 2.9 apresenta os resultados das vazões máximas baseadas em dados observados no posto fluviométrico 59125000 (Galdinópolis) e as vazões máximas estimadas com base nos hidrogramas calculados com o modelo MGB-IPH neste mesmo local. Observa-se que as diferenças são relativamente pequenas no caso de cheias de baixo tempo de retorno, porém atingem 31% no caso da vazão máxima de 50 anos de tempo de retorno, sendo os valores obtidos com a série calculada superiores aos obtidos com a série observada.

Quadro 2.9: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados e observados no posto fluviométrico 59125000 (Galdinópolis).

TR	Calculado	Observado	Diferença
2	38	35	10%
5	59	49	21%
10	73	59	25%
20	87	68	29%
50	104	80	31%

O Quadro 2.10 apresenta os resultados das vazões máximas baseadas em dados observados no posto fluviométrico 59135000 (Piller), localizado no rio Bonito, um dos afluentes do rio Macaé na parte alta da bacia, e as vazões máximas estimadas com base nos hidrogramas calculados com o modelo MGB-IPH neste mesmo local. Observa-se que as diferenças atingem no máximo 25% no caso da vazão máxima de 50 anos de tempo de retorno, mas são relativamente baixas no caso dos tempos de retorno inferiores, sendo que, novamente, os valores obtidos com a série calculada são superiores aos obtidos com série observada.

Quadro 2.10: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados e observados no posto fluviométrico 59135000 (Piller).

TR	Calculado	Observado	Diferença
2	23	23	0%
5	40	35	14%
10	51	43	19%
20	62	50	24%
50	75	60	25%

Como já foi comentado, os postos fluviométricos com dados na bacia do rio Macaé estão em locais de pequenas áreas de drenagem. As comparações das vazões máximas obtidas com as séries observadas e calculadas sugerem que existe uma tendência de superestimativa por parte do modelo. Entretanto, deve-se considerar a própria incerteza nos dados observados em função da extrapolação da curva-chave. No posto fluviométrico 59120000 (Macaé de Cima), por exemplo, a maior vazão medida utilizada na elaboração da curva-chave é de aproximadamente $11\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, de acordo com os dados da ANA. Esta vazão é menor do que a metade da vazão com tempo de retorno de 2 anos estimada neste local. Já no posto fluviométrico 59135000 (Piller) a maior vazão medida é de aproximadamente $14\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, o que significa que mesmo a vazão máxima com tempo de retorno de 2 anos está na faixa de extrapolação da curva-chave. Portanto, não se pode considerar acurada a estimativa de máximas tendo por base os dados observados de vazão.

2.5.2 Comparação das Estimativas de Vazões Máximas com o Estudo da FGV

No estudo sobre as cheias do rio Macaé, realizado pela FGV (2004), as vazões máximas foram estimadas usando um modelo hidrológico baseado no hidrograma unitário e na separação de escoamento pelo método SCS, conforme descrito previamente. Naquele estudo, as vazões máximas foram estimadas para diversos locais.

Os resultados do modelo MGB-IPH foram utilizados para gerar estimativas de vazões máximas nos mesmos locais considerados no estudo da FGV (2004). Considerou-se novamente válida a distribuição de Gumbel para a análise das vazões máximas, e foram utilizados os dados calculados pelo modelo MGB-IPH no período total simulado, de 1950 a 2011.

O Quadro 2.11 apresenta uma comparação entre os resultados de vazões máximas na foz do rio Macaé. Observa-se que as vazões máximas calculadas pelos dois métodos são bastante próximas, com diferenças inferiores a 10% quando as vazões calculadas pela FGV são tomadas como referência. Entretanto, é necessário ressaltar que as duas estimativas devem estar supervaloradas, porque em nenhum dos casos foi levado em conta o efeito da planície de inundação, que contribuiria para atenuar a vazão máxima.

Quadro 2.11: Comparação entre vazões máximas na foz do rio Macaé, estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).

TR (anos)	Vazão máxima FGV ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Vazão máxima MGB-IPH ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Diferenças (%)
2	309	309	0%
5	462	443	-4%
10	563	532	-6%
20	661	617	-7%
50	Não disponível	727	-

O Quadro 2.12 apresenta a comparação entre os resultados de vazão máxima do rio Macaé imediatamente a jusante da confluência com o rio São Pedro. Observa-se que os resultados são semelhantes usando as duas metodologias. Entretanto, cabe, novamente, uma ressalva: nos dois casos as vazões máximas estão superestimadas porque novamente não foi levado em conta o efeito de amortecimento provocado pela inundação da planície adjacente aos rios.

Quadro 2.12: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio Macaé, imediatamente a jusante da confluência com o rio São Pedro (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).

TR (anos)	Vazão máxima FGV ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Vazão máxima MGB-IPH ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Diferenças (%)
2	271	303	12%
5	406	435	7%
10	495	522	5%
20	580	606	4%
50	Não disponível	714	-

O Quadro 2.13 apresenta a comparação entre os resultados de vazão máxima do rio Macaé imediatamente a montante da confluência com o rio São Pedro. Observa-se que os resultados são semelhantes usando as duas metodologias, embora os valores estimados a partir dos resultados da simulação com o modelo MGB-IPH sejam cerca de 10% maiores, tomando como referências as vazões máximas calculadas no estudo da FGV (2004). Entretanto, é importante lembrar mais uma vez que nos dois casos as vazões máximas estão superestimadas porque não foi levado em conta o efeito de amortecimento provocado pela inundação da planície adjacente aos rios.

Quadro 2.13: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio Macaé, imediatamente a montante da confluência com o rio São Pedro (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).

TR (anos)	Vazão máxima FGV ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Vazão máxima MGB-IPH ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Diferenças (%)
2	199	229	15%
5	298	335	12%
10	363	405	12%
20	426	472	11%
50	Não disponível	559	-

O Quadro 2.14 apresenta a comparação entre os resultados de vazão máxima do rio São Pedro imediatamente a montante da confluência com o rio Macaé. Neste local as vazões estimadas pelas duas metodologias também são semelhantes, com diferenças de aproximadamente 5%. Novamente, insiste-se em lembrar que nos dois casos as vazões máximas estão superestimadas porque não foi levado em conta o efeito de amortecimento provocado pela inundação da planície adjacente aos rios, que também é importante ao longo do rio São Pedro.

Quadro 2.14: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio São Pedro, imediatamente a montante da confluência com o rio Macaé (possivelmente os dois modelos superestimam a vazão máxima por não incorporarem a representação da inundação da planície).

TR (anos)	Vazão máxima FGV (m ³ .s ⁻¹)	Vazão máxima MGB-IPH (m ³ .s ⁻¹)	Diferenças (%)
2	107	102	-5%
5	160	152	-5%
10	195	185	-5%
20	229	218	-5%
50	Não disponível	259	-

O Quadro 2.15 apresenta a comparação entre os resultados de vazão máxima do rio Macaé, no local proposto para a construção de uma barragem para a contenção de cheias (cerca de 6 km a montante da Ponte do Baião). Observa-se que os resultados são diferentes usando as duas metodologias, sendo que as estimativas baseadas nas simulações com o modelo MGB-IPH são 18 e 33% superiores do que as estimativas anteriores obtidas no trabalho da FGV (2004). Neste local, a influência da planície de inundação é menor, uma vez que a largura da planície neste trecho ainda é relativamente pequena. Desta forma, as vazões máximas estimadas pelos modelos são relativamente consistentes, apesar das diferenças que apresentam.

Quadro 2.15: Comparação entre vazões máximas estimadas no relatório da FGV (2004) e usando o modelo MGB-IPH, adotado no plano de bacia, no rio Macaé, no local proposto para a construção da barragem de controle de cheias.

TR (anos)	Vazão máxima FGV (m ³ .s ⁻¹)	Vazão máxima MGB-IPH (m ³ .s ⁻¹)	Diferenças (%)
2	Não disponível	190	-
5	Não disponível	279	-
10	Não disponível	338	-
20	297	395	33%
50	397	468	18%

De maneira geral, as vazões máximas estimadas com o modelo MGB IPH se aproximam das vazões máximas estimadas no estudo realizado pela FGV (2004). Em alguns locais as vazões calculadas usando o MGB-IPH são maiores e em outros locais são menores do que as vazões estimadas no estudo anterior (FGV, 2004). Entretanto, a validade destas vazões máximas no trecho inferior do rio Macaé e do rio São Pedro é limitada.

2.5.3 Comparação das Estimativas de Vazões Máximas com o Estudo de Regionalização da CPRM

Utilizando as equações de regionalização apresentadas no estudo da CPRM (2002), é possível obter alguns valores para comparação com as estimativas obtidas com base nos resultados do modelo MGB-IPH. A equação de regionalização da CPRM para a bacia 59 é apresentada no item 2.3.1. De acordo com a CPRM (2002) esta equação pode ser utilizada apenas em bacias com área de drenagem entre 22 e 597 km².

O Quadro 2.16 mostra a comparação no caso do posto fluviométrico Galdinópolis, no rio Macaé (posto código 59125000), onde a área de drenagem é de 101 km². Observa-se que neste caso a diferença entre as vazões máximas calculadas é próxima de zero.

Quadro 2.16: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados pelo modelo MGB-IPH no posto fluviométrico 59125000 (Galdinópolis) e usando a equação de regionalização desenvolvida pela CPRM (2002).

TR	Calculado	Regionalização CPRM	Diferença
10	73	73	0%
20	87	92	-5%
50	104	107	-3%

O Quadro 2.17 mostra a comparação de vazões máximas estimadas usando regionalização e usando o modelo MGB-IPH em São Romão, no rio Macaé, onde a área de drenagem é de 338 km². Observa-se que as vazões máximas calculadas no presente estudo são ligeiramente mais baixas do que aquelas obtidas pela equação de regionalização de vazão proposta pela CPRM (2002).

Quadro 2.17: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados pelo modelo MGB-IPH no rio Macaé em São Romão (área de drenagem de 338 km²) e usando a equação de regionalização desenvolvida pela CPRM (2002).

TR	Calculado	Regionalização CPRM	Diferença
10	230	253	-9%
20	271	318	-15%
50	323	370	-13%

O Quadro 2.18 mostra a comparação de vazões máximas estimadas usando regionalização e usando o modelo MGB-IPH no rio Macaé, no local sugerido para a construção de uma barragem de contenção de cheias no estudo da FGV (2004), onde a área de drenagem é de 642 km². Este local tem uma área de drenagem ligeiramente maior do que o limite máximo de aplicabilidade sugerido por CPRM (2002), que é de 597 km². Observa-se que as vazões máximas calculadas no presente estudo são mais baixas do que aquelas obtidas pela equação de regionalização de vazão proposta pela CPRM (2002).

Quadro 2.18: Vazões máximas estimadas usando a distribuição de Gumbel a partir dos dados calculados pelo modelo MGB-IPH no rio Macaé no local em que foi sugerida a construção de uma barragem de contenção de cheias pela FGV (2004), onde a área de drenagem é de 642 km², e usando a equação de regionalização desenvolvida pela CPRM (2002).

TR	Calculado	Regionalização CPRM	Diferença
10	338	488	-31%
20	395	614	-34%
50	468	714	-36%

As comparações das vazões máximas obtidas utilizando as séries de vazões calculadas pelo modelo MGB-IPH com as vazões máximas obtidas a partir da equação de regionalização apresentada por CPRM (2002) mostram que são encontrados valores semelhantes nas bacias com área de drenagem menor, ou seja, dentro da faixa de validade da equação de regionalização. No local em que foi sugerida, pela FGV (2004), a construção da barragem de contenção de cheias do rio Macaé, as vazões estimadas por regionalização são superiores às vazões máximas estimadas usando o modelo MGB-IPH.

2.5.4 Considerações Finais sobre a Qualidade das Estimativas de Vazão Máxima usando o Modelo MGB-IPH

As vazões máximas obtidas foram baseadas em uma técnica de simulação contínua, que constitui uma interessante alternativa nos casos em que existem poucos dados para uma regionalização de vazões mais confiável, como ocorre no caso da bacia do rio Macaé. Esta técnica tem diversas vantagens em relação às técnicas baseadas em simulação de eventos isolados, conforme atestam Boughton e Droop (2003) e Cameron et al. (1999).

Para avaliar a qualidade das estimativas, foram realizadas comparações com vazões máximas obtidas por três outros métodos: análise estatística de vazões máximas nos postos fluviométricos; vazões máximas estimadas no estudo FGV (2004) usando um modelo não calibrado baseado em simulação de eventos; vazões máximas estimadas usando uma equação de regionalização (CPRM, 2002).

Os resultados obtidos utilizando o modelo MGB-IPH ficaram dentro da faixa de variação dos valores obtidos nos estudos anteriores. Foram encontrados valores ligeiramente maiores do que os valores calculados diretamente com os dados observados nos postos fluviométricos, ao mesmo tempo em que foram obtidos valores ligeiramente menores do que os obtidos usando a equação de regionalização.

Considerando a incerteza inerente aos dados observados, e as incertezas associadas aos outros métodos, as estimativas de vazões máximas aqui obtidas podem ser consideradas adequadas. Os resultados devem ser encarados com cautela em bacias pequenas, onde o tempo de concentração é menor do que 1 dia, em função do intervalo de tempo diário utilizado nas simulações com o modelo MGB-IPH. Na parte baixa da bacia do rio Macaé e do rio São Pedro as vazões estimadas estão certamente superestimadas, porque o efeito de amortecimento das cheias exercido pelo processo de inundação das planícies adjacentes a estes rios não foi representado.

2.5.5 Vazões Máximas Estimadas por Modelagem Hidrológica em Pontos de Referência na Bacia do Rio Macaé

O Quadro 2.19 apresenta as vazões máximas estimadas por uma análise de frequências usando a distribuição de Gumbel, e os resultados da simulação chuva-vazão com o modelo MGB-IPH, no período de 1950 a 2011. O **Quadro 2.20** apresenta as vazões específicas máximas nos mesmos locais, enquanto a Figura 2.5 mostra a espacialização destes pontos na RH VIII. Observa-se que as maiores vazões específicas ocorrem na região da cabeceira do rio Macaé, com valores da ordem de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Elas decrescem de montante para jusante, atingindo valores da ordem de 0,31 a $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ na região próxima à foz, o que é esperado, pela diminuição da precipitação que ocorre de montante para jusante e pela mudança da declividade da bacia.

A bacia do rio São Pedro apresenta vazões específicas máximas na faixa de 0,39 a $0,66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ nos locais analisados. Considerando o tempo de retorno de 20 anos, o rio São Pedro apresenta uma vazão específica máxima de $0,46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ na sua foz, enquanto que, neste mesmo local, o rio Macaé apresenta uma vazão máxima específica de $0,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Esta diferença se justifica pela menor precipitação média que ocorre na bacia do rio São Pedro, conforme apresentado no mapa de isoietas no relatório de caracterização da bacia e reproduzido na **Figura 2.4**.

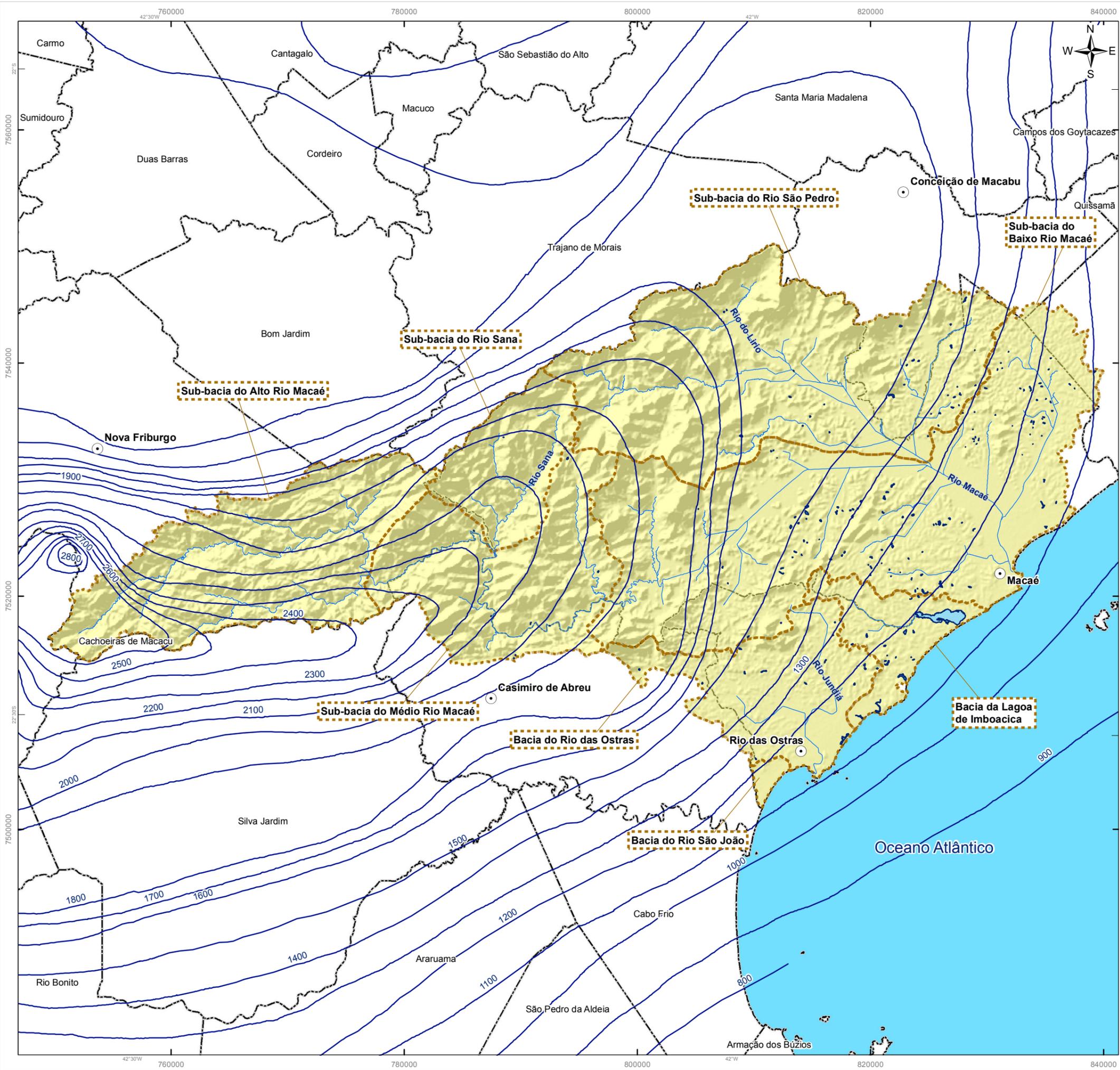


Figura 2.4 Mapa de Precipitação

- Legenda**
- Sede dos Municípios
 - Hidrografia Principal
 - Isoetas
 - Corpo Hídrico
 - Limites das Bacias e Sub-Bacias Hidrográficas
 - Limite Municipal

Referências Cartográficas:

- Limites das Bacias e Sub-Bacias: delimitada de acordo com modelo digital de elevação gerado a partir da base cartográfica altimétrica na escala 1: 50.000 (IBGE/SEA) - disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Hidrografia: Ortofotos Digitais IBGE/SEA - 2005/2006, escala 1:25.000 disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Relevo: SRTM/ NASA, 2000;
- Limites Municipais: escala 1:50.000 Fundação CEPERJ, 2010;
- Sedes: escala 1:1.000.000 IBGE, 2010;
- Pluviometria: escala 1:2.500.000, CPRM - 2010.

Escala numérica em A3: 1:320,000

Escala Gráfica:

Informações Cartográficas:

Sistema de Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Meridiano Central: -45
 Fuso: 23S
 Datum: SIRGAS 2000



Projeto

PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS

Quadro 2.19: Vazões máximas estimadas a partir da modelagem hidrológica no período de 1950 a 2011 (nos pontos localizados na planície as vazões provavelmente estão superestimadas).

Rio	Local	Área bacia (km ²)	Vazões máximas para diferentes Tempos de Retorno – TR (m ³ /s)		
			TR=10anos	TR=20anos	TR=50anos
Macaé	Macaé de Cima	60	50	60	73
Macaé	Galdinópolis	101	73	87	104
Bonito	Piller	70	51	62	75
Macaé	São Romão	338	230	271	323
Macaé	Barragem FGV	642	338	395	468
Macaé	Ponte do Baião	659	347	406	482
Macaé	Fazenda Airis	841	442	519	617
Macaé	BR-101	927	404	471	558
Macaé	Montante São Pedro	938	405	472	559
Macaé	Jusante São Pedro	1416	522	606	714
Macaé	Montante Jurumirim	1513	539	627	740
Macaé	Foz	1714	532	617	727
Sana	Barra do Sana	110	66	78	93
Jurumirim	Foz	110	19	22	27
São Pedro	Possível Barragem	298	141	166	197
São Pedro	Montante BR-101	308	135	158	188
São Pedro	Foz	478	185	218	259

Quadro 2.20: Vazões máximas específicas (m³.s⁻¹.km⁻²) estimadas a partir da modelagem hidrológica no período de 1950 a 2011 (nos pontos localizados na planície as vazões provavelmente estão superestimadas).

Rio	Local	Área bacia (km ²)	Vazões máximas específicas para diferentes Tempos de Retorno – TR (m ³ /s/km ²)		
			TR=10anos	TR=20anos	TR=50anos
Macaé	Macaé de Cima	60	0,84	1,00	1,21
Macaé	Galdinópolis	101	0,73	0,86	1,03
Bonito	Piller	70	0,73	0,88	1,07
Macaé	São Romão	338	0,68	0,80	0,96
Macaé	Barragem FGV	642	0,53	0,61	0,73
Macaé	Ponte do Baião	659	0,53	0,62	0,73
Macaé	Fazenda Airis	841	0,53	0,62	0,73
Macaé	BR-101	927	0,44	0,51	0,60
Macaé	Montante São Pedro	938	0,43	0,50	0,60
Macaé	Jusante São Pedro	1416	0,37	0,43	0,50
Macaé	Montante Jurumirim	1513	0,36	0,41	0,49
Macaé	Foz	1714	0,31	0,36	0,42
Sana	Barra do Sana	110	0,60	0,71	0,85
Jurumirim	Foz	110	0,17	0,20	0,24
São Pedro	Possível Barragem	298	0,47	0,56	0,66
São Pedro	Montante BR-101	308	0,44	0,51	0,61
São Pedro	Foz	478	0,39	0,46	0,54

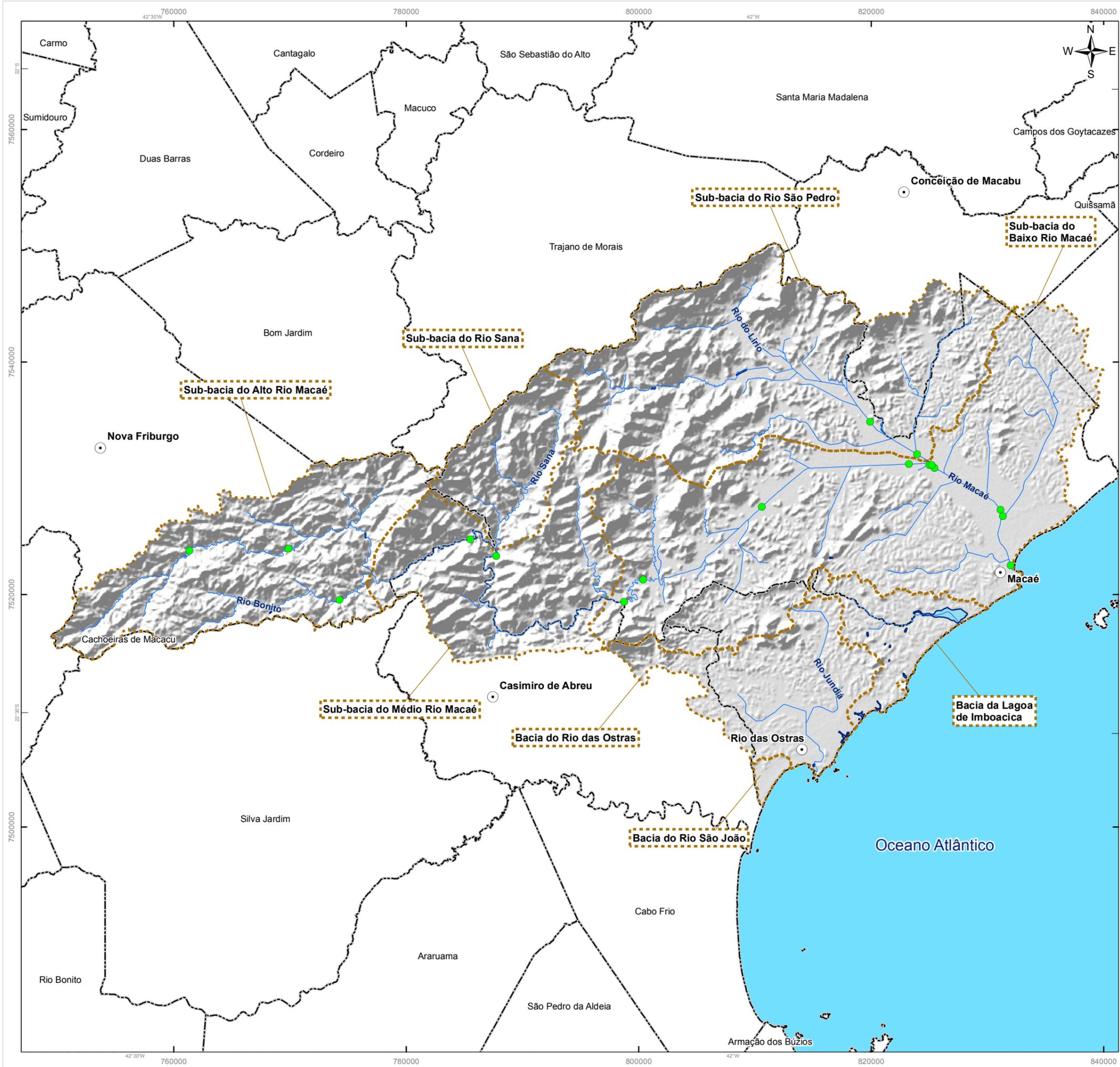


Figura 2.5 Mapa de localização dos pontos de interesse para os quais foram obtidos dados de vazões máximas estimadas a partir da modelagem hidrológica

Legenda

- Sede dos Municípios
- Pontos de de Interesse
- Hidrografia Principal
- Corpo Hídrico
- - - Limites das Bacias e Sub-Bacias Hidrográficas
- Limite Municipal

Referências Cartográficas:

- Limites das Bacias e Sub-Bacias: delimitada de acordo com modelo digital de elevação gerado a partir da base cartográfica altimétrica na escala 1: 50.000 (IBGE/SEA) - disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Hidrografia: Ortofotos Digitais IBGE/SEA - 2005/2006, escala 1:25.000 disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Relevo: SRTM/ NASA, 2000;
- Limites Municipais: escala 1:50.000 Fundação CEPERJ, 2010;
- Sedes: escala 1:1.000.000 IBGE, 2010;
- Pontos de Vazões Máximas: Consórcio Macaé/Ostras, 2012.

Escala numérica em A3: 1:320.000

Escala Gráfica:

Informações Cartográficas:

Sistema de Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Meridiano Central: -45
 Fuso: 23S
 Datum: SIRGAS 2000



Projeto

PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS

2.6 Controle de Cheias

As cheias na bacia do rio Macaé afetam grandes extensões de áreas da planície adjacente ao rio e seus afluentes na sua porção inferior. Do ponto de vista das inundações na área urbana de Macaé este processo de inundação das planícies localizadas a montante é benéfico, pois atenua os picos das vazões antes de sua chegada ao trecho final do rio, onde existe a área urbana.

Idealmente, os impactos das enchentes do rio Macaé deveriam ser evitados pela não ocupação urbana das áreas baixas naturalmente inundáveis. Esta seria, sem dúvida, a alternativa mais barata para evitar os prejuízos com as inundações. Entretanto, em alguns casos, estas áreas já se encontram ocupadas. Neste caso, os prejuízos poderiam ser minimizados usando medidas estruturais, como diques e pôlders, ou utilizando medidas não estruturais, como o sistema de alerta de cheias. Também pode ser cogitada a desapropriação das áreas ocupadas ou a transferência de seus moradores para outras localidades mais adequadas, algo que é complexo e com impactos sociais, mas que pode ser economicamente mais eficiente.

Para evitar as cheias nestas áreas já ocupadas podem ser consideradas algumas alternativas de controle. No trabalho da FGV (2004) foram sugeridas as alternativas de dragagem do leito do rio; construção de reservatório de controle de cheias; e formação de pôlder com drenagem interna por bombeamento.

A alternativa considerada mais efetiva no estudo da FGV foi a construção de um reservatório no rio Macaé, a montante do local conhecido como Ponte do Baião. Entretanto, no mesmo estudo foi afirmada a necessidade de avaliar a possibilidade de construção de um segundo reservatório no rio São Pedro.

2.6.1 Reservatório de Controle de Cheias no Rio São Pedro

A possibilidade de construção de um reservatório de controle de cheias no rio São Pedro foi avaliada, de forma preliminar. Para isto procurou-se identificar, utilizando mapas e imagens de satélite, um local ao longo do rio São Pedro que reunisse as seguintes características: grande área de drenagem; vale estreito; pouca ocupação humana na possível área alagada.

Não foi encontrado nenhum local adequado, que reunisse ao mesmo tempo estas três características. Entretanto, foi possível analisar um local cerca de 3 km a montante da BR101 e pouco menos de 7 km a montante da confluência com o rio Macaé (Figura 2.6). A área de drenagem neste local é de, aproximadamente, 313 km², e a ocupação é com a agropecuária. Porém, o vale é relativamente aberto, exigindo a construção de uma barragem de comprimento considerável (cerca de 2 km), o que aumentaria seu custo.

Utilizando como referência o MDE do SRTM, a área inundada foi estimada, preliminarmente, em cerca de 10 km² e o volume máximo para a cota 15 metros foi estimado em aproximadamente 30 milhões de m³.

As vazões máximas no local foram estimadas a partir dos resultados das simulações utilizando o modelo MGB-IPH, considerando válida a distribuição de Gumbel, como mostra o Quadro 2.21.

Quadro 2.21: Vazões máximas do rio São Pedro, no local avaliado preliminarmente para a construção de uma barragem de controle de cheias, a partir de dados de vazão obtidos com o modelo MGB-IPH e considerando válida a distribuição de Gumbel.

TR	Calculado (m ³ /s)
2	77
5	115
10	141
20	166
50	197

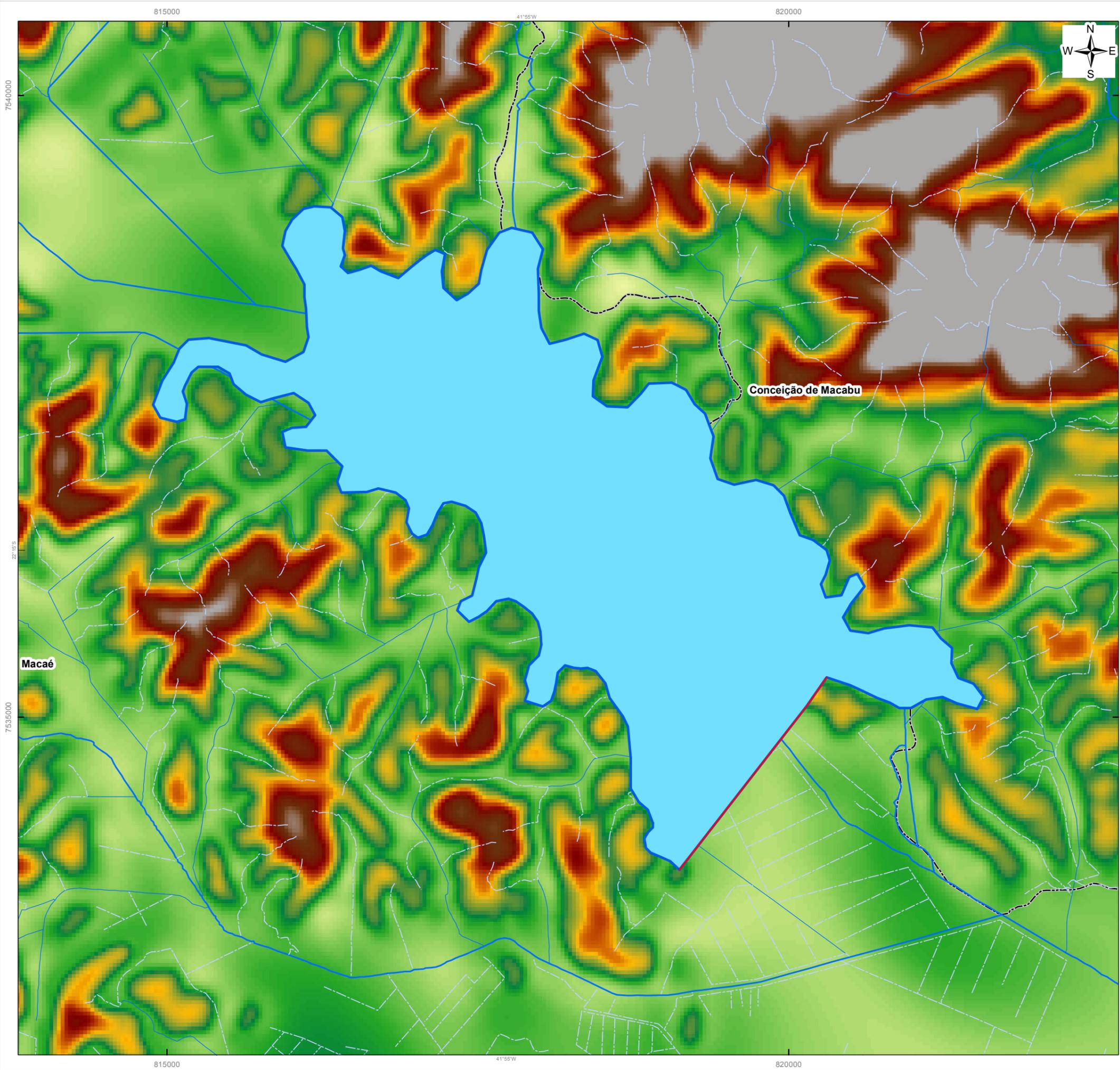


Figura 2.6 Mapa de Localização do Eixo da Barragem Analisada no Rio São Pedro

Legenda

- Hidrografia Principal
- Hidrografia Secundária
- Canal
- Alternativa Analisada
- Barragem
- Limite Municipal

Altimetria (m)

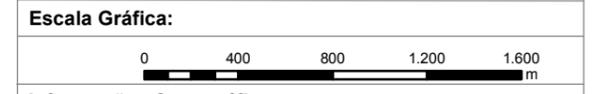
Value

- High : 510,842
- Low : -3,39654

Referências Cartográficas:

- Altimetria e Barragem: modelo digital de elevação gerado a partir da base cartográfica altimétrica na escala 1: 50.000 (IBGE/SEA) - disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Hidrografia: Ortofotos Digitais IBGE/SEA - 2005/2006, escala 1:25.000 disponibilizado pelo INEA/DIMFIS/GEOPEA, 2012;
- Limites Municipais: escala 1:450.000 Estado do Ambiente - RJ, 2010;

Escala numérica em A3: 1:30.000



Informações Cartográficas:

Sistema de Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Meridiano Central: -45
 Fuso: 23S
 Datum: SIRGAS 2000



Projeto

PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS

Consórcio MACAÉ OSTRAS:

Para demonstrar que o reservatório com as características descritas seria capaz de atenuar as cheias no local da barragem, foi considerada uma simulação de propagação em reservatório de um hidrograma hipotético, com vazão de base de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e vazão de pico de $197 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, que equivale à vazão máxima de 50 anos de tempo de retorno no local, como mostra o quadro anterior. Considerou-se ainda um tempo de base de cerca de 2 dias, resultando o hidrograma apresentado na Figura 2.7.

A Figura 2.8 apresenta o resultado da simulação da propagação da cheia no reservatório, considerando que ele é provido de descarregadores de fundo com cerca de 8 m^2 . Observa-se que o reservatório é capaz de reduzir a vazão de $197 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para $33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nesta simulação foi necessário utilizar apenas cerca de 50% do seu volume máximo.

Ficou, portanto, demonstrado que é razoável aprofundar a análise sobre a possível construção de um reservatório de contenção de cheias no rio São Pedro. Para isto, seriam necessários dados topográficos mais detalhados. O local identificado não apresenta ocupação intensa, embora exija a construção de uma barragem de grande comprimento, que pode encarecer a obra.

A demonstração da capacidade do reservatório de reduzir as vazões de pico não significa que serão reduzidos os níveis máximos de cheia no rio Macaé, junto à cidade de Macaé, caso esta alternativa de controle seja adotada. Os trechos inundáveis mais críticos encontram-se muito próximos à foz, e o real comportamento das cheias depende das marés, conforme demonstrado por Amaral (2003), além dos processos de inundação da planície, que não foram avaliados neste estudo.

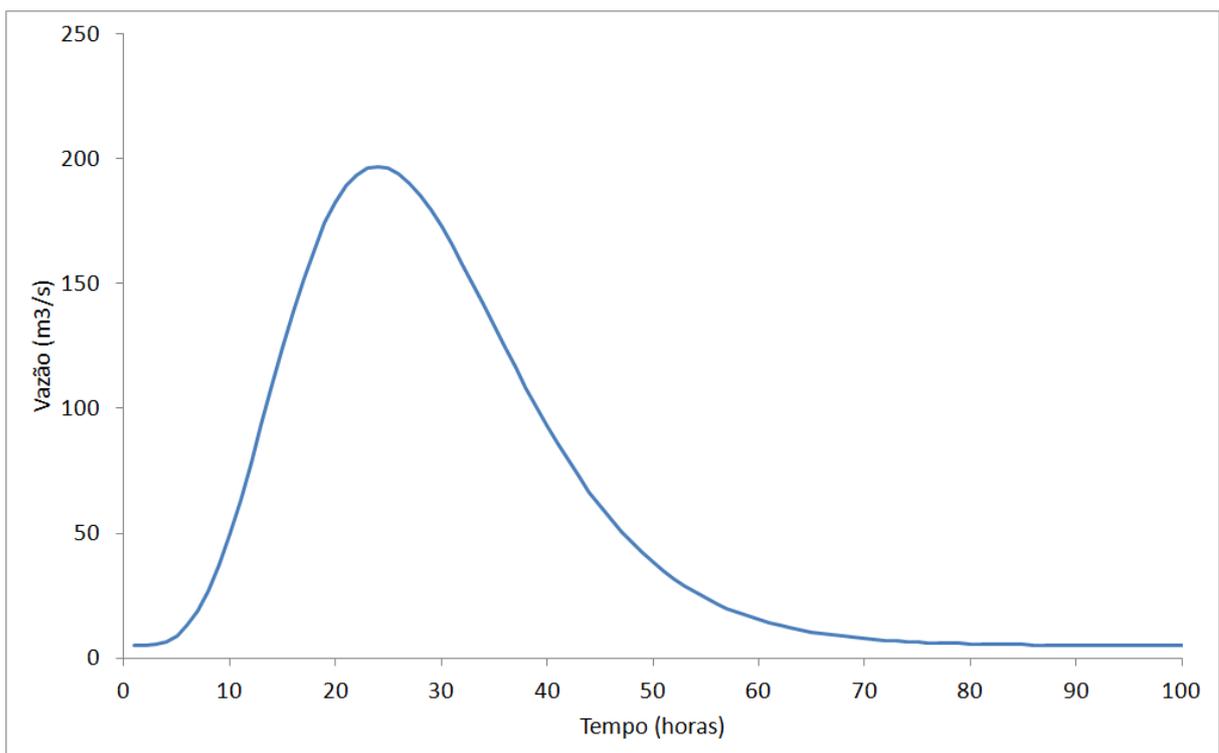


Figura 2.7: Hidrograma hipotético considerado na análise do reservatório de contenção de cheias do rio São Pedro.

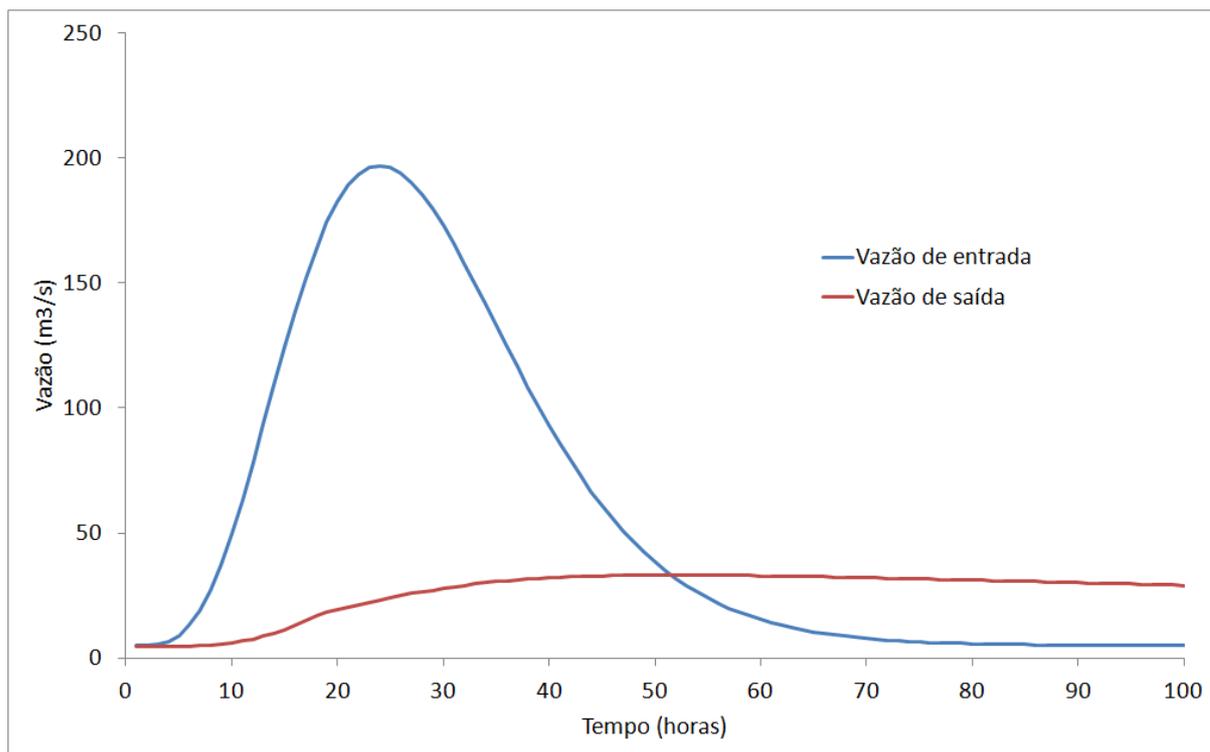


Figura 2.8: Simulação de controle de cheia hipotética no rio São Pedro.

2.6.2 Sistema de Alerta de Cheias

O Instituto Estadual do Ambiente – INEA possui e opera um sistema de alerta de cheias. Seu principal objetivo é informar as autoridades e a população quanto à possibilidade de chuvas intensas e de inundações graduais (cheias) que possam causar perdas materiais e humanas.

O Sistema de Alerta de Cheias conta com o monitoramento de dados de chuva e nível de calha de rio (seção) em regiões como a Baixada Fluminense, a Região Serrana (Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis), a região Norte-Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, assim como localidades como Barra Mansa, Cantagalo, São Gonçalo e outras regiões. Pertencentes à bacia do rio Macaé totalizam 11 estações, pluviométricas ou hidrológicas.

Neste sistema, o parâmetro intensidade de chuva está classificado em diferentes níveis sucessivos: chuva leve, chuva moderada, chuva forte e chuva muito forte, o qual está associado a um estágio de alerta. Os tipos de alerta são apresentados no Quadro 2.22.

Quadro 2.22: Estágios de alerta de chuvas e níveis de calha dos rios monitorados pelo INEA

Estágio	Situação
Vigilância	sem chuvas ou chuvas fracas e esparsas. Nível d'água normal
Atenção	Previsão de ocorrência de chuvas moderadas e fortes
Alerta	Registro de chuvas intensas. Subida de nível do rio acima do normal
Alerta Máximo	Continuação da chuva. Rio atingindo 80% do nível de transbordamento

Fonte: www.inea.inofper.net

Alertas emitidos pelo Sistema de Monitoramento para a localidade solicitada podem ser divulgados via mensagens de telefone celular, por correio eletrônico (e-mail) e em sites de relacionamentos (Twitter e Facebook).

A página eletrônica do sistema de monitoramento permite acompanhar a situação atual, online, de cada região, mas também é possível consultar o histórico dos dados já cadastrados (www.inea.infoper.net).

Portanto, trata-se de uma alternativa para mitigação dos impactos de cheia, mediante aviso prévio aos ocupantes das áreas inundáveis, que é efetiva, mas que apresenta limitações óbvias, inerentes aos sistemas de alerta.

2.7 Considerações Finais

As cheias na bacia do rio Macaé são formadas na parte alta da bacia e causam impactos no trecho inferior do rio Macaé, próximo à foz, onde existe uma grande concentração urbana.

A inundação da planície adjacente ao rio Macaé e seus afluentes é natural e contribui para a redução das vazões máximas no trecho final do rio. Os impactos das inundações ocorrem porque existem ocupações de natureza urbana em áreas naturalmente inundáveis.

As vazões máximas estimadas estão sujeitas à incerteza. Em locais de pequenas áreas de drenagem a metodologia adotada nas simulações com o modelo MGB-IPH (usando dados diários) não permite uma boa estimativa das vazões máximas instantâneas.

Nos locais ao longo do trecho inferior do rio Macaé e dos seus afluentes, onde o rio inunda grandes áreas de planície durante as cheias, os valores estimados no relatório são, provavelmente, superestimados. Para aprimorar a estimativa das vazões máximas na parte baixa da bacia recomenda-se a utilização de um modelo capaz de representar o processo de inundação da planície e a influência da maré, como é o caso do modelo de Miguez e Mascarenhas (1999), utilizado por FGV (2004), e do modelo de Paz, Collischonn e Tucci (2010). Porém, a utilização de um modelo deste tipo exige que seja realizado um levantamento topográfico mais detalhado do que os atualmente disponíveis, baseados nas cartas 1:50.000 do IBGE e Modelo Digital de Elevação do SRTM.

Estudos anteriores identificaram como alternativas de controle a construção de reservatórios, a dragagem e a construção de polders. Foi avaliada, de forma extremamente preliminar, a possibilidade de construção de um segundo reservatório de controle de cheias no rio São Pedro. O local identificado permitiria reduzir a contribuição deste afluente do rio Macaé na formação das cheias a jusante. Entretanto a barragem seria relativamente cara, devido às características do vale.

Idealmente, o impacto das cheias deveria ser combatido através de um ordenamento territorial, evitando a ocupação de áreas naturalmente inundáveis. Em bairros já consolidados poderia ser adotada a solução de proteção com diques, formando polders, que deveriam ter um sistema de drenagem por bombeamento e áreas de reservação temporária da água da drenagem local. Ou ainda, ser cogitada a desapropriação ou transferência de moradores.

Devido às características do rio Macaé, que apresenta leito arenoso, e que foi retificado com uma largura da calha maior do que sua largura natural, a dragagem de manutenção do leito deve ser realizada periodicamente. Sem esta manutenção o rio deverá formar bancos de areia no fundo e poderá erodir as margens, voltando aos poucos à forma meandrante original, agravando os impactos das cheias neste tramo.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, K. J. 2003 Estuário do rio Macaé: Modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. Dissertação de Mestrado. COPPE-UFRJ.
- BERTONI, J., & LOMBARDI NETO, F. (1990). Conservação do Solo. São Paulo: Icone.
- BOUGHTON, W.; DROOP, O. 2003 Continuous simulation for design flood estimation—a review. *Environmental Modelling & Software* 18 (2003) 309–318.
- BURROUGH, P. A., & MCDONELL, R. A. (1998). Principles of geographic information systems. Oxford: Oxford University Press.
- CAMERON D.S.; BEVEN K.J.; TAWN J.; BLAZKOVA S.; NADEN P. 1999 Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, Volume 219, Number 3, 8 July 1999 , pp. 169-187(19)
- CARVALHO FILHO, A. D., Lumbreras, J. F., & Santos, R. D. (2003). Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Estado do Rio de Janeiro (escala 1:250.000). Rio de Janeiro - RJ: Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (no prelo).
- CARVALHO, N. D. (2008). Hidrossedimentometria prática. Rio de Janeiro: Interciência.
- CASTRO, R. D., & Medeiros, K. M. (2012).
http://www.caminhosgeologicos.rj.gov.br/pg_placa.php?p=109. Fonte:
<http://www.caminhosgeologicos.rj.gov.br/>.
- COSTA, T. C. (2005). Estimativa de perdas de solo para microbacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa Solos.
- CPRM 2002 Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 59.
- CPRM. (2010). Atlas Pluviométrico do Brasil. Rio de Janeiro-RJ: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- FAO-PNUMA-UNESCO. (1981). Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma: FAO, PNUMA y UNESCO.
- FERNANDES, M. M. (2009). Valoração dos serviços ambientais da floresta de mata atlântica associados a qualidade e quantidade da água na APA do Sana (Tese). Seropédica - RJ: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia.
- FGV 2004 Estudo de cheias no baixo curso do rio Macaé, em especial sobre o núcleo urbano. Rio de Janeiro.
- FREITAS, S. C. (2010). Perda de solo e erosão fluvial na bacia hidrográfica do rio Macacu-RJ. Seropédica-RJ: Instituto de Florestas, UFRRJ.
- LOMBARDI, N. (1977). Rainfall erosivity - its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brazil. Tese de Mestrado. West Lafayette - US.: Purdue University.
- MIGUEZ, M.G.; MASCARENHAS, F.C.B. Modelação matemática de cheias urbanas através de um esquema de células de escoamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, ABRH, v. 4, n.1, p. 119-140, 1999.
- MONTEBELLER, C. A., Franco, E. M., Carvalho, D. F., & Valcarcel, R. C. (2004). Estimativa de índices de erosividade obtidos a partir de dados pluviométricos para o estado do Rio de Janeiro - 2ª aproximação. Reunião Brasileira de Manejo de Conservação do Solo e da Água. Santa Maria: UFSM.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. 2007 Hidrologia Estatística. CPRM Belo Horizonte. 552p.

- PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. 2010 Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, p. 152-165, 2010.
- ROSMAN, P. C. C., 2001 Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- TUCCI, C. E. M. 1998 Regionalização de Vazões. ABRH Porto Alegre.
- UTE-NORTE-FLUMINENSE. (2011). Assoreamento de Cursos d'água - Impactos à geração termelétrica e medidas mitigadoras - O caso do rio Macaé. Macaé.
- VANONI, V. A. (1975). Manuals & Reports on Engineering Practice. Sedimentation Engineering, 54.
- WILLIAMS, J. R. (1976). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. ASAE.
- WISCHMEIER, J. R. (1978). Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation Planning. Washington, DC.: USDA Agric. Handbook. US Government Printing Office.