

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/6: 1183-1202
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BENGALAS, NOVA FRIBURGO, RJ, UTILIZANDO O POTENCIAL DE GEOTECNOLOGIAS NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE RISCO À INUNDAÇÃO

Hydrologic Modeling of Bengalas' Basin, Nova Friburgo - RJ, using the Geotechnology Potential to Definition of Flood Risk Areas

**Evaldo Flávio Gomes Correia¹, Gilberto Pessanha Ribeiro²
& Alessandra Carreiro Baptista³**

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Pós-Graduação em Engenharia da Computação/Geomática
Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã
20550-013 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil
evaldocorreia@yahoo.com.br

²Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP
Instituto do Mar/Departamento de Ciência do Mar
Av. Alm. Saldanha da Gama, 89 – Ponta da Praia
11030-400 – Santos – SP, Brasil
gilberto.pessanha@unifesp.br

³Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ
Departamento de Engenharia
BR 465, Km 7 - 23890-000 – Seropédica – RJ, Brasil
acbaptista@gmail.com

Recebido em 06 de Outubro, 2014/ Aceito em 19 de Junho, 2015
Received on October 06, 2014/ Accepted on June 19, 2015

RESUMO

O presente artigo concentra-se no estudo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Bengalas utilizando o potencial das geotecnologias em análise espacial. Esse rio passa pelo centro de Nova Friburgo e causa inundações frequentes com inúmeros transtornos de ordem econômica e social em função da observada ocupação desordenada em suas margens. A metodologia teve suporte no uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para organização e processamento das características físicas da bacia hidrográfica, que, por sua vez, serviram de entrada para os modelos computacionais de chuva-vazão e de escoamento superficial, e por fim, na geração de mapas com os resultados das simulações. Essas modelagens são empregadas, principalmente, no gerenciamento de recursos hídricos, cujos resultados são utilizados para prever o alcance de catástrofes e antecipação das medidas necessárias para mitigar prejuízos materiais e financeiros, e ainda, evitar perdas de vidas humanas em áreas de grande risco ambiental. Os resultados da modelagem da transformação chuva-vazão e a passagem dos volumes gerados pela precipitação efetiva na calha do rio Bengalas permitiu identificar e analisar as áreas aptas a inundações, com concentração expressiva, na porção central da cidade. A área suscetível à inundação para uma chuva com tempo de recorrência de 50 anos, foi de aproximadamente 1,0 km²,

distribuída ao longo de 8,5 km ao longo dos rios, na região central de Nova Friburgo-RJ, sendo essa região caracterizada por processo de urbanização consolidada.

Palavras-chave: Risco de Inundação, Rio Bengalas, Bacia Hidrográfica, Modelagem Hidrológica.

ABSTRACT

This article focuses on the study of hydrological of the Bengalas Basin using the potential of geotechnology. This river passes through Nova Friburgo center and cause frequent flooding, and many disorders of economic and social order, depending on the observed irregular occupation along its banks. The methodology had support in the use of GIS for organizing and processing of spatial information about the physical characteristics of the watershed which, in turn, will be using this information as the inputs to computational models of rain runoff and drainage, and finally, to generate maps with the simulation results. These models are utilized mainly in the management of water resources, the results of the simulations could be used to predict the extent of disasters and anticipation of the necessary measures to mitigate financial and material losses, and also prevent loss of life in areas of high environmental risk. The results of modeling of rainfall-runoff transformation and the passage of the volumes generated by the effective precipitation in the channel, allowed us to identify and analyze susceptible areas of flooding in the central portion of the city. Our results pointed out that a susceptible area of flooding for a rainfall with a recurrence time of 50 years, the most critical studied, is approximately 1.0 km², distributed in its 8.5 km along rivers in central part of Nova Friburgo - RJ which is characterized by process-consolidated urbanization.

Keywords: Flood Risk, Rio Bengalas, Hydrographical Basin, Modelling Hydrographic.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, alguns fatores tais como, a impermeabilização do solo, o desmatamento, as alterações de climas e a ocupação das margens, passaram a ser determinantes, para definir a menor ou a maior suscetibilidade de uma área a enchentes (KOBAYAMA *et al*, 2006).

Ward (1978) descreve as inundações como sendo uma das mais dramáticas interações entre homem e o seu ambiente, enfatizando tanto a força dos eventos naturais, como os esforços insuficientes para controlá-lo. E destaca que os próprios homens se expõem ao risco ao se instalar nas planícies de inundação ou locais suscetíveis a inundações.

Maidment (2002) acredita que um gerenciamento de recursos hídricos adequado, aliado a uma política pública de uso e ocupação do solo são fundamentais para evitar as grandes catástrofes oriundas da ocupação desordenada das margens dos rios.

Para Usace (2010), as técnicas avançadas de modelagem hidrológica tornaram-se viáveis, porque agora a geração e manipulação de dados podem ser feitas com eficiência por meio de operações espaciais em um SIG, não só economizando tempo e esforço, como também, melhorando a precisão em relação aos métodos tradicionais.

A utilização de geotecnologias juntamente com os modelos matemáticos permite averiguar a dinâmica hidrológica e hidráulica da bacia hidrográfica. A tomada de decisões baseada nos resultados destes métodos possibilita a minimização dos impactos decorrentes das grandes tragédias, no caso estudado são as enchentes. Por outro lado, deve-se ressaltar que se constitui uma ferramenta eficaz para subsidiar a elaboração dos Planos Diretores de Ordenamento de Uso do Solo Urbano que é uma exigência da Lei nº 10.257 de 2001 (que estabelece as diretrizes gerais da política urbana) para os municípios cuja população seja superior a 20.000 habitantes.

O presente artigo concentra-se no estudo hidrológico da bacia do rio Bengalas, cujo rio principal de mesmo nome, corta o município de Nova Friburgo, RJ, no sentido Sul-Norte. Esse município, um dos mais importantes da região serrana, sofre frequentemente com inundações e deslizamentos, cujos dados históricos e acontecimentos recentes mostram que a ocupação inadequada de encostas e margens dos rios são as áreas destacadas e negativamente afetadas.

O uso da geotecnologia aplicado a risco de inundação permitiu a definição de parâmetros essenciais para a tomada de decisões com vistas à mitigação dos efeitos das recorrentes cheias

que assolam a bacia hidrográfica estudada, sobretudo, nas áreas mais densamente povoadas.

Com o estudo, ora desenvolvido, parâmetros como a delimitação das áreas inundáveis, associadas a um risco hidrológico pré-definido, podem suscitar, por exemplo, a definição do limite de exclusão da ocupação humana necessárias na calha secundária do rio, ou ainda, podem definir as medidas complementares necessárias e mais adequadas para mitigar o efeito das cheias nos locais de maior risco, tais como a definição das áreas prioritárias para a recomposição de matas ciliares, os locais mais apropriados para implantação de parques fluviais e os locais da calha principal que necessitam de proteção das margens.

2. ESTUDO HIDROLÓGICO E SUA IMPORTÂNCIA À PREVISÃO DE CHEIAS

Uma bacia hidrográfica é definida como uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório (SILVEIRA, 2009).

Tucci (2009) considera a hidrologia como sendo uma ciência interdisciplinar em evolução diante dos crescentes problemas, devido à ocupação das bacias, da demanda pela utilização da água e impacto sobre o meio ambiente da Terra, que passou de uma ciência preponderantemente descritiva e qualitativa, para uma área do conhecimento na qual os métodos quantitativos são explorados por meio de modelos matemáticos e estatísticos, melhorando os resultados e a previsão de ocorrência de inundações.

Os estudos hidrológicos usam variadas fontes de dados representados no ambiente de um Sistema de Informação Geográfica para entender e gerenciar as questões ambientais relacionados aos recursos hídricos, por sua aplicação na gestão destes recursos faz desses softwares uma poderosa ferramenta de desenvolvimento de soluções para questões como: abastecimento d'água, proteção contra enchentes, conflitos no uso dos recursos hídricos e degradação pelo aumento da população e desenvolvimento

econômico. (MAIDMENT, 2002)

Para Maidment (2002), um gerenciamento de recursos hídricos adequado, aliado a uma política pública de uso e ocupação do solo são fundamentais para evitar as grandes catástrofes oriundas da ocupação irregular das margens dos rios, já que os fenômenos hidrológicos ocorrem de forma aleatória sendo impossível determinar a sua intensidade, frequência ou onde irá ocorrer.

Ward (1978) descreve as inundações como sendo uma das mais dramáticas interações entre homem e o seu ambiente, enfatizando tanto a força dos eventos naturais, como os esforços insuficientes para controlá-lo. E diz ainda, que os próprios homens se expõem ao risco ao se instalar nas planícies de inundação ou locais suscetíveis a inundações. Para ele, as inundações são um fenômeno natural e faz parte da normalidade, ocorrendo aleatoriamente, mas, com uma frequência que pode ser prevista. Em eventos excepcionais produzem vazões de pico que excedem a capacidade de calha dos canais, fazendo com que uma parte do escoamento ocorra fora dos canais naturais atingindo as planícies de inundação.

A definição adotada para inundação foi dada por Carvalho *et al.*, (2007), que define a inundação como sendo o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio. O mesmo a diferencia das enchentes ou cheias que é a elevação do nível d'água no canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar.

A Figura 1 mostra, em uma seção do rio, a diferença entre uma enchente e uma inundação.



Fig. 1 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação. Fonte: Carvalho *et al.* (2007, p. 92).

Atualmente, de acordo com Carvalho *et al.* (2007), o aumento do número de pessoas vivendo em áreas de risco de deslizamentos, enchentes e inundações têm sido uma das características negativas do processo de urbanização e crescimento das cidades brasileiras, o que se verifica, principalmente, nas regiões metropolitanas. Os fatores econômicos, políticos, sociais e culturais também contribuem para o avanço e a perpetuação desse quadro indesejável. Ele sintetizou o problema das áreas de risco de deslizamentos, enchentes e inundações nas cidades brasileiras nos itens abaixo:

- Crise econômica e social com solução em longo prazo;
- Política habitacional para baixa renda historicamente ineficiente;
- Ineficácia dos sistemas de controle do uso e ocupação do solo;
- Inexistência de legislação adequada para as áreas suscetíveis aos riscos mencionados;
- Inexistência de apoio técnico para as populações;
- Cultura popular de “morar no plano”.

Castro *et al.*, (2008) considera a classificação da intensidade pelo critério relativo mais preciso do que em termos absolutos, pois se baseiam na relação entre a necessidade de recursos para o restabelecimento da situação de normalidade e sua disponibilidade nas áreas afetadas pelo desastre. A Tabela 1 é um resumo dessa classificação proposta por Tominaga *et al.*, (2009).

Tominaga *et al.* (2009) constatam que, no Brasil, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são derivados da dinâmica

externa da Terra, tais como: inundações e enchentes, escorregamentos de solos e/ou rochas e tempestades, normalmente associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados.

Segundo Kobiyama *et al.* (2006), nas últimas décadas, o número de registro de desastres naturais em várias partes do mundo vem aumentando consideravelmente. Para eles, principalmente, devido ao aumento da população, a ocupação desordenada e ao intenso processo de urbanização e industrialização. Entre os principais fatores que contribuem para desencadear estes desastres nas áreas urbanas destacam-se a impermeabilização do solo, o adensamento das construções, a conservação de calor e a poluição do ar. Enquanto que nas áreas rurais, destaca-se a compactação dos solos, o assoreamento dos rios, os desmatamentos e as queimadas.

Em particular, as cheias no rio Bengalas são historicamente recorrentes e têm sido registradas e documentadas desde 1820, quando a então Vila de Nova Friburgo foi fundada. Em sua história recente, no ano de 2011, na madrugada do dia 12 de janeiro, a cidade de Nova Friburgo foi surpreendida com um intenso temporal, fora dos padrões para o período chuvoso da região serrana, que levou a cidade a viver um cenário catastrófico provocado pelo transbordamento dos rios e deslizamentos de terra decorrente. Esse evento, por sua magnitude, trata-se de uma das maiores tragédias causadas por fenômenos naturais, não só da cidade de Nova Friburgo, mas, em toda região serrana do Rio de Janeiro. A Figura 2, a seguir ilustra eventos ocorridos no Rio Bengalas em 1920, 1940 e 2011.

Tabela 1: Classificação dos desastres em relação à intensidade

| Nível | Intensidade | Situação |
|-------|--|--|
| I | Desastres de pequeno porte, também chamados de acidentes, onde os impactos causados são pouco importantes e os prejuízos pouco vultosos. (Prejuízo menor que 5% PIB municipal) | Facilmente superável com os recursos do município. |
| II | De média intensidade, onde os impactos são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultosos. (Prejuízos entre 5% e 10% PIB municipal) | Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial. |
| III | De grande intensidade, com danos importantes e prejuízos vultosos. (Prejuízos entre 10% e 30% PIB municipal) | A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais. (Situação de Emergência – SE) |
| IV | De muito grande intensidade, com impactos muito significativos e prejuízos muito vultosos. (Prejuízos maiores que 30% PIB municipal) | Não é superável pelo município, sem que receba ajuda externa. Eventualmente necessita de ajuda internacional. (Estado de Calamidade Pública – ECP) |

Fonte: Tominaga, *et al.* (2009, p. 15).



a) Praça Getúlio Vargas. Enchente do rio Bengalas no ano de 1920.



b) Avenida Galdino do Vale. Margens do Rio Bengalas enchente no ano de 1940.



c) rio Bengalas na confluência com os rios Cônego e Santo Antônio, centro de Nova Friburgo-Jan/2011.



d) Margem do Rio Bengalas, próximo ao Hospital Municipal Raul Sertã- Jan/2011.

Fig. 2 - Registros fotográfico de inundações no centro de Nova Friburgo-RJ. Fonte: Fundação D. João VI, (2011); Baptista (2011).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para os estudos compreende a bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo-RJ, limitada pelas coordenadas geográficas do paralelo sul 22° 11' e 22° 24' e os meridianos de longitude oeste 42° 37' e 42° 27' 39°.

A Figura 3, a seguir, apresenta o mapa de localização da Bacia do rio Bengalas.

O rio Bengalas é formado pela confluência dos rios Santo Antônio e Cônego e com uma área de drenagem de 187,7 km², abrangendo parte dos Municípios de Nova Friburgo e de Bom Jardim.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Enumeramos nesta seção os dados utilizados no presente artigo, bem como os

softwares que auxiliaram no tratamento e análises dos destes dados. Também introduzimos os métodos aplicados e a estrutura da abordagem metodológica propostas para alcançar os objetivos traçados.

4.1 Material

A base de dados cartográficos planialtimétricas, em formato digital, na escala de 1:50.000, digitalizadas a partir das folhas SF-23-Z-B-II-4 (Nova Friburgo), SF-23-Z-B-2 (Duas Barras) SF-23-Z-B-III-1 (Cordeiro) e SF-23-Z-B-III-1, disponibilizada pelo IBGE. Como também, Modelo Digital de Elevação e fotografias aéreas ortorretificadas disponíveis em Geotif, CCAR / IBGE e SEA-RJ.

Do Plano de Águas Pluviais de Nova Friburgo, da prefeitura da Cidade de Nova Friburgo foram utilizados dados de Uso e

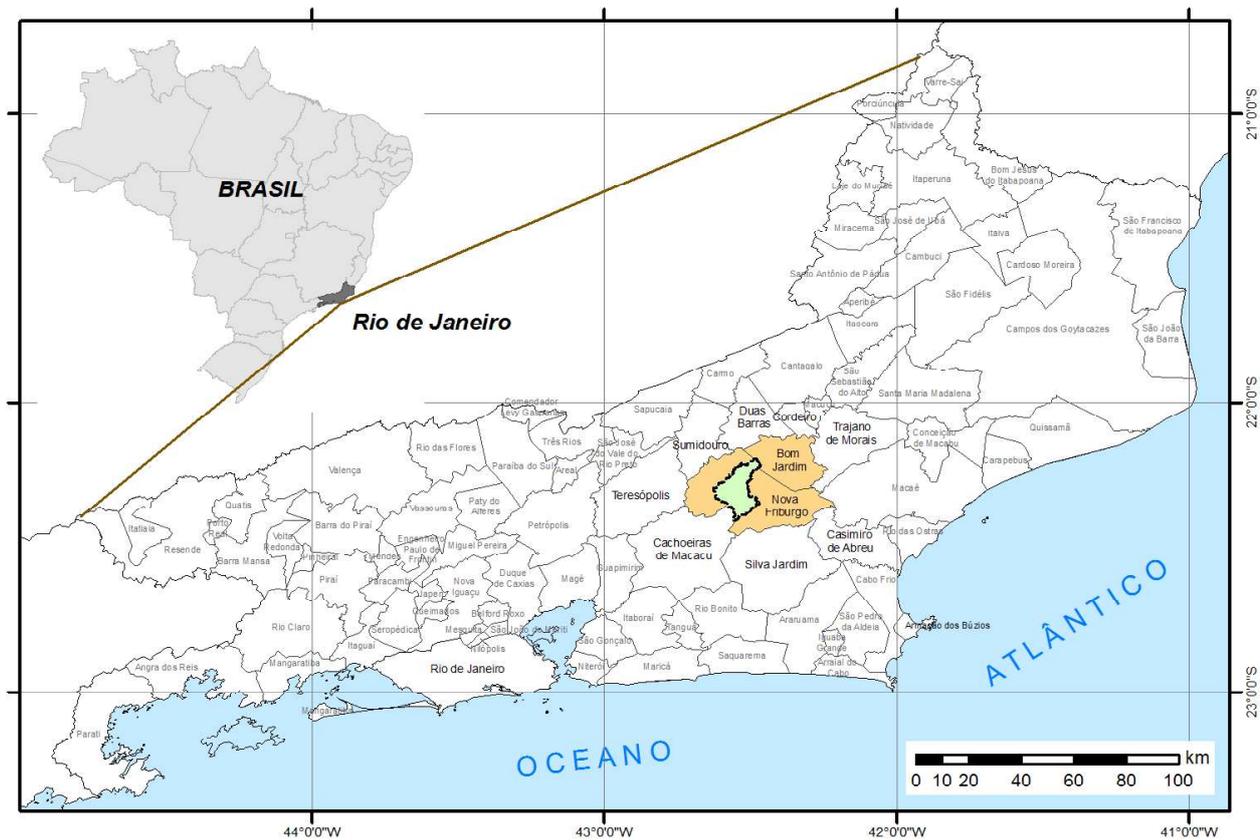


Fig. 3 - Localização da bacia hidrográfica do rio Bengalas.

cobertura Vegetal na escala de 1:25.000, em formato *shapefile*, e o conjunto de vinte e quatro seções topobatimétricas do rio Bengalas, que corresponde a uma distância média entre elas de aproximadamente 350 m.

Para descrever o solo da Bacia hidrográfica, foi utilizado dados da carta de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:250.000, em formato *shapefile*, classificado pelo novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2009.

Os dados de pluviometria e fluviometria localizadas na área de estudo e adjacências foram levantados na Agência Nacional de Águas (HidroHeb), para o período compreendido entre 1967 a 2005, dados estes consistidos. Também foram utilizados os postos pluviométricos e de nível provenientes do sistema de Alerta de Cheias de Nova Friburgo, mantida pelo Instituto Estadual do Ambiente - INEA, com dados disponíveis entre 2009 a 2011. Na Tabela 2, está indicada as estações utilizadas, com sua descrição, município onde

está localizada e o tipo dos dados obtidos: (P) pluviometria, (F) fluviométricas e (PF) pluviometria e fluviométricas, bem como as coordenadas geográficas de cada estação.

4.2 Programas e extensões

O Sistema de Informação Geográfica utilizado foi o ArcGIS, versão 9.3, módulos ArcMap; Extensões: *Geospatial Hydrological Modeling Extension - GeoHMS* versão 4.2; *Gis Tools for support of HEC-RAS using ArcGis - GeoRAS* versão 4.2 e *Arc Hydro for ArcGIS 9* version 1.4 Beta.

Para manipulação dos dados das estações pluviométricas foram utilizados os softwares: DSSVue 2.0.1; Sistema computacional para análises hidrológicas - SisCAH versão 1.0 e Sistemas de Informações Hidrológicas - HIDRO 1.2

Para simulação do processo transformação chuva-deflúvio foi utilizado o *Hydrologic Modeling System - HMS* versão 3.4; e para a modelagem hidráulica o *River Analysis System - RAS* versão 4.1.0.

Tabela 2: Estações de monitoramento da ana e do sistema de aleta

| Código | Nome | Município | Tipo | Latitude | Longitude |
|---|----------------------|---------------|------|------------|-------------|
| Agência Nacional de Águas | | | | | |
| 2242005 | Faz São João | Nova Friburgo | P | -22°23'22" | -42°30'00" |
| 2242020 | Vargem Grande | Nova Friburgo | P | -22°16:36" | -42°30'8" |
| 2242021 | Bom Jardim | Bom Jardim | P | -22°09'24" | -42°24'58" |
| 2242022 | Fazenda Mendes | Nova Friburgo | P | -22°17'9" | -42°39'36" |
| 2242024 | Teodoro de Oliveira | Nova Friburgo | P | -22°22'44" | -42°33'15" |
| 2242025 | Cascatinha do Cônego | Nova Friburgo | P | -22°21'00" | -42°34'00" |
| 2242070 | Nova Friburgo | Nova Friburgo | P | -22°17'00" | -42°32'00" |
| 58830000 | Friburgo | Nova Friburgo | F | -22°17'00" | -42°32'00" |
| 58832000 | Conselheiro Paulino | Nova Friburgo | F | -22°13'37" | -42°31'16" |
| Sistema de Alerta de Cheia de Nova Friburgo | | | | | |
| 2242120 | Nova Friburgo | Nova Friburgo | PF | -22°16'43" | -42°32'10" |
| 2242125 | Ypu | Nova Friburgo | PF | -22°17'44" | -42°31'370" |
| 2242126 | Olaria | Nova Friburgo | PF | -22°18'31" | -42°32'320" |
| 2242127 | Sítio Santa Paula | Nova Friburgo | PF | -22°16'50" | -42°34'210" |
| 2242124 | Conselheiro Paulino | Nova Friburgo | PF | -22°13'37" | -42°31'160" |
| 2242107 | Pico Caledônia | Nova Friburgo | P | -22°21'32" | -42°34'00" |

Fonte: HidroWeb (ANA, 2010) e Sistema de Alerta de Cheia (INEA, 2010).

O Arc Hydro é um modelo de dados geoespacial e temporal para dados de recursos hídricos que opera dentro do ArcGIS descrevendo o sistema hídrico natural. No entanto, conforme MAIDMENT (2002) sua estrutura suporta modelos de simulação hidrológica, mas ele sozinho não é um modelo de simulação. A simulação hidrológica é realizada com a troca de dados entre modelos hidrológicos independentes. Mas, para o mesmo autor a modelagem trará ganhos significativos quando o projeto cobrir grandes áreas, com diferentes fontes de dados e que envolva complicação de modelos hidrológicos complexos que exijam um maior grau de formalidade da estrutura de informação. No entanto, o mesmo autor diz que ele também pode ser aplicado em pequena escala, inclusive subdivisões urbanas para o estudo dos padrões de escoamento superficial das águas pluviais.

O banco de dados deste modelo é composto por quatro classes de objetos que representam o sistema hídrico, e esses, por sua vez, podem ser conectados a Séries Temporais. Os objetos podem ser vistos na Figura 4 na qual estão as representações das áreas de drenagem por polígonos, cursos d'água por linhas e suas confluências por pontos, além do modelo digital que representam os canais de drenagem.

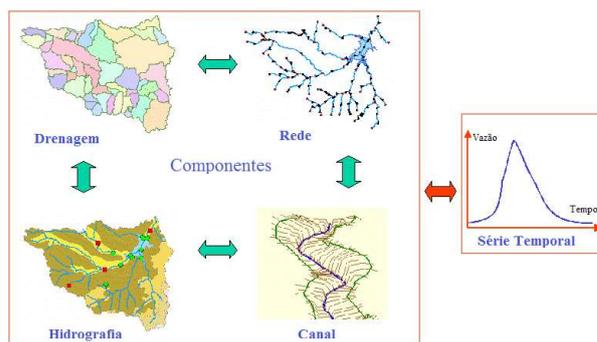


Fig. 4 - Representação dos componentes empregados na modelagem Arc Hydro. Fonte: Adaptado de Maidment (2002).

O HEC-GeoHMS é um conjunto de ferramentas geoespaciais desenvolvidas para realizar estudos hidrológicos. Este programa permite aos usuários visualizar informações espaciais, características das bacias hidrográficas, realizar análises espaciais, delinear sub-bacias e córregos, construir entradas para modelos hidrológicos, e ajudar com a preparação da documentação (USACE, 2009a).

Esta extensão converte as informações dos dados espaciais do SIG para o modelo HEC-HMS. As relações entre SIG, HEC-GeoHMS e HEC-HMS são ilustradas na Figura 5 na qual a linha tracejada vertical que separa as funções

do SIG da hidrologia de bacias hidrográficas. Esta figura mostra a divisão das tarefas entre o ambiente SIG e o modelo de simulação. Por um lado, no SIG, serão realizadas a compilação e pré-processamento dos dados espaciais das características físicas da bacia hidrográfica e, por outro, a partir da exportação destes dados pelo GeoHMS, a organização das estruturas de entrada destes dados no programa de simulação hidrológica.

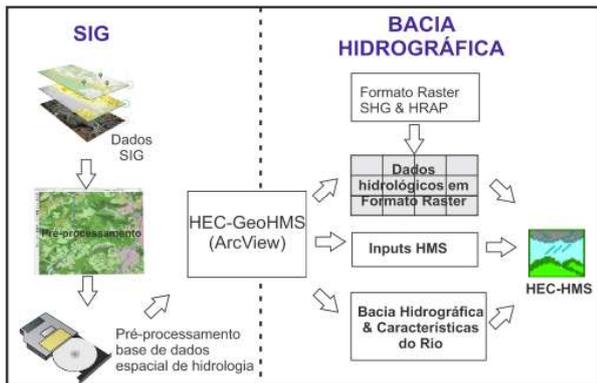


Fig. 5 - Representação esquemática da relação entre os SIG e o modelo hidrológico HEC-HMS. Fonte: adaptado de USACE (2010).

HEC-GeoRAS é uma extensão do ArcGis especificamente concebido para ser usado no processamento dados geoespaciais para o HEC-RAS, desenvolvida dentro de uma *Cooperative Research and Development Agreement* (CRADA) entre HEC e ESRI usando fundos da USACE para Pesquisa e Desenvolvimento (USACE, 2009b).

Esta extensão permite a criação de um arquivo de importação contendo dados de atributos geométricos gerados a partir de um modelo digital de elevação do terreno (MDE) e de informações complementares, tais como uso do solo, diques, áreas de armazenamento entre outros dados.

Da mesma forma que a extensão exporta dados do SIG para HEC-RAS, ela permite que os resultados do HEC-RAS sejam trazidos e processados do ambiente SIG. Estes resultados, perfis da superfície d'águas e dados de velocidade exportados das simulações do HEC-RAS, podem ser tratados pela HEC-

GeoRAS e analisados no SIG para geração do mapeamento da planície de inundação, cálculos dos danos causados pelas inundações, restauração de ecossistemas, e preparação e resposta de alerta de inundações. (USACE, 2009b).

4.3 Abordagem Metodológica

A metodologia tem suporte no uso de um SIG projetado para estes propósitos, extraindo informações que, por sua vez, serão entrada de dados na fase de modelagem, e reforçando a apresentação dos resultados em simulações por meio de mapas. Basicamente divide-se este processo em três etapas: “SIG”, “Modelagem” e “Suporte à Tomada de Decisão/Simulação”.

O “SIG” compreende a geração do banco de dados espaciais, adotando o modelo ArcHydro; o ‘Processamento’, utilizará o geo-HMS e geo-RAS para tratamento das características fisiográficas da bacia e do curso d’água; e a ‘Apresentação’ onde as manchas de inundação, resultado das simulações, serão identificadas. A “Modelagem” emprega o modelo chuva-deflúvio elaborado pelo *Soil Conservation Service* (SCS) e implementado no *Hydrologic Modeling System* (HMS) para gerar o hidrograma e estimar o pico da cheia, bem como será estudado o comportamento hidráulico pelo método de simulação do escoamento dos canais, pelo método *Standard Step Method*, também implantando, no *River Analysis System* (RAS), ambos do *Hydrologic Engineering Center* (HEC). Na última etapa, “Tomada de Decisão/Simulação”, foram levantadas questões sobre o ambiente que interfiram no sistema hidrológico e hidráulico e simulados cenários, eventos extremos, para prever e conseqüentemente evitar desastres naturais, onde os mapas digitais seguramente são estrategicamente importantes viabilizando a espacialização de conjunto de dados temáticos em contextos de aferição de como as simulações representam efetivamente a realidade. O fluxograma da metodologia adotada está resumido na Figura 6.

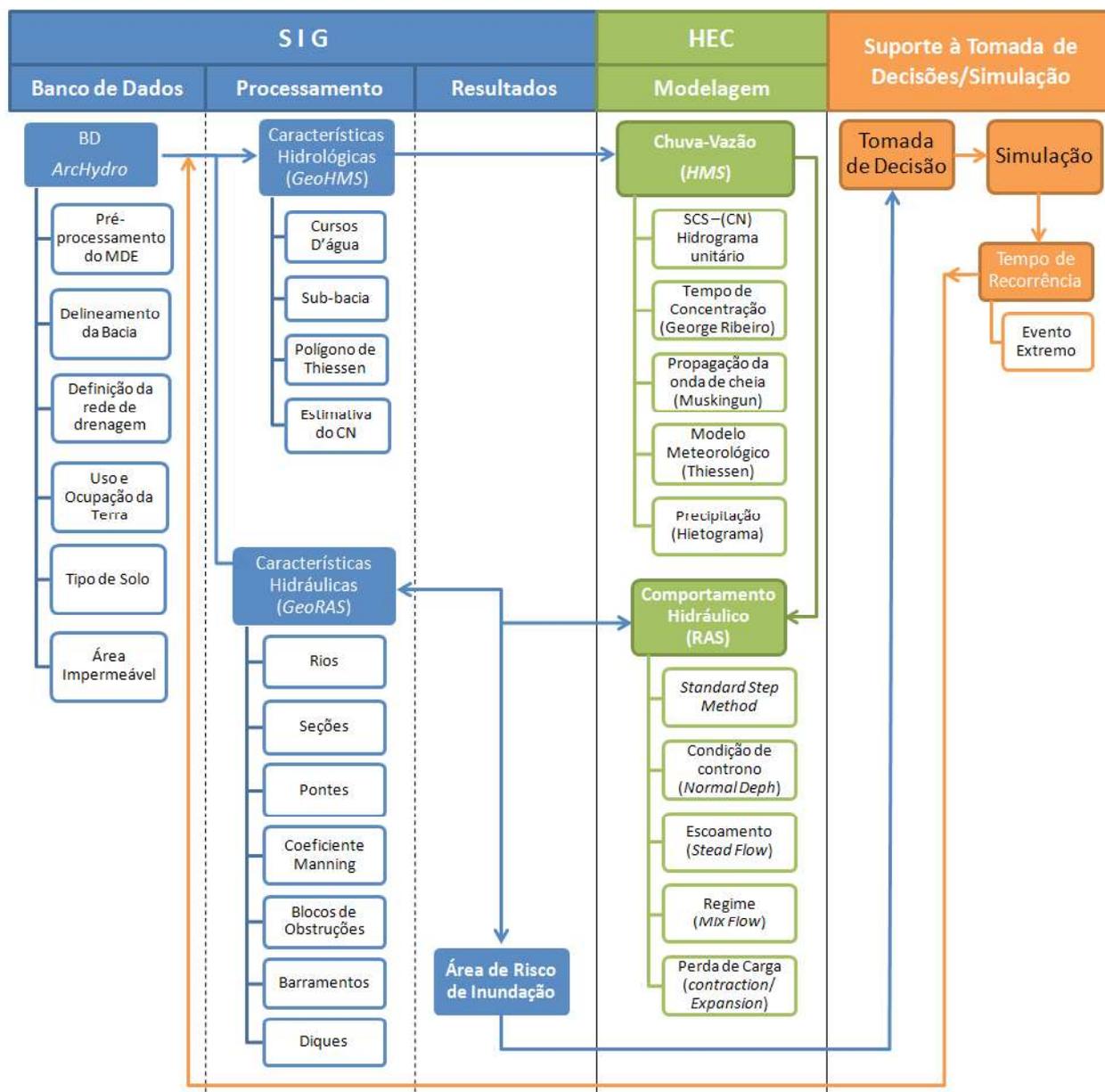


Fig. 6 - Diagrama de fluxo da Metodologia.

No presente artigo foram utilizados diversos procedimentos inerentes à hidrologia: tempo de concentração, tempo de recorrência, chuvas intensas e vazões máximas, método de *Thiessen*, modelo de armazenamento e hidrograma unitário, que serão comentados durante os resultados. Os principais métodos aqui expostos, apesar de depender dos citados acima, tem um maior impacto no alcance dos objetivos propostos, são eles:

4.3.1 Modelos chuva-vazão

O processo de transformação de chuva-deflúvio corresponde saber a qual fração da precipitação observada que irá transformar-se em escoamento superficial, ou seja, que irá

transformar-se em precipitação efetiva (PAIVA, 2003). A obtenção da precipitação efetiva é dada pela expressão (1) do SCS (*Soil Conservation Service*) por:

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (1)$$

Sendo:

P_e : escoamento superficial direto em [mm];

P : precipitação em [mm];

S : retenção potencial do solo em [mm].

O fator S , na expressão (2) a seguir, se traduz em uma estimativa da capacidade de infiltração máxima do solo. O fator $0,2S$ é uma

estimativa das perdas iniciais (interceptação e retenção). Corresponde ao valor mínimo da precipitação, para o qual se inicia o escoamento superficial.

O valor de S (PAIVA, 2003) é determinado por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Sendo,

S : retenção potencial do solo em [mm].

CN : o valor da curva número e é função do grupo de solo, umidade antecedente e uso e ocupação do solo não tendo unidades.

O passo seguinte é a determinação do fator CN (*Curve Number*). Este é obtido a partir do grupo de solo ao qual pertence à área de estudo, pelas condições do uso e ocupação do solo, da correção desses valores para as condições de umidade antecedente do solo. Estas tabelas, foram omitidas no presente artigos, mas são fáceis de encontra-las na literatura de hidrologia, como no Tucci (2009) e Ponce (1989).

4.3.2 Modelo de perfil de linha d'água

Estes modelos servem para calcular as elevações do nível d'água em canais abertos simulando o escoamento em cursos d'água naturais ou construídos, com seções transversais regulares. Além da simulação do escoamento em canais, estes permitem também simular o escoamento da passagem da água nas margens e adjacências dos cursos d'água, definindo as cotas dos níveis nas planícies de inundação. Os perfis de linha d'água de uma seção para outra são computados resolvendo a equação da energia com um processo interativo chamado de *Standard Step Method* (USACE, 2010), cuja expressão é a seguinte:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \quad (3)$$

Sendo,

Z_1 e Z_2 : Elevação da linha d'água nas seções S1 e S2

Y_1 e Y_2 : Velocidades Médias nas seções S1 e S2

V_1 e V_2 : velocidades média nas seções

α_1 e α_2 : coeficiente de velocidade

g : aceleração da gravidade

Sua utilização implica em algumas premissas simplificadoras no modelo, a saber:

- Regime de escoamento é permanente;
- Escoamento é gradualmente variado. Exceto em estruturas como pontes, bueiros e Vertedouros, onde o regime pode ser bruscamente variado e são utilizadas as equações do momento e outras equações para o cálculo da linha d'água.
- Condição de contorno e a profundidade normal
- Fluxo é unidimensional;
- A declividade da linha de energia é constante entre duas seções transversais;
- As declividades do canal inferiores a 1:10.

Também se faz necessário a utilização de um conjunto de coeficientes para representar a rugosidade do canal e sua planície de inundação chamados de coeficiente n de *Manning*, para mais detalhes sobre este ver Chow (1964) e USACE (2010).

4.4 Calibração dos Modelos Hidrológico e Hidráulico

Tomando como referência uma seção topobatimétrica e um nível conhecido, foi feito a comparação do valor calculado com o observado e checado o ajuste do modelo. Caso não esteja ajustado, será necessário realizar melhorias na estimação dos parâmetros e repetir o procedimento desde a transformação da chuva em vazão já com os novos parâmetros.

A calibração da modelagem se deu utilizando valores observados de nível e precipitação provenientes do Sistema de Alerta de Cheias de Nova Friburgo. E os parâmetros ajustados foram utilizados na simulação dos eventos de chuva para 10, 20 e 50 anos de recorrência.

5. RESULTADOS

A metodologia ora apresentada foi implementada e realizada em três etapas: a primeira foi o pré-processamento dos dados para extração da fisiografia da bacia hidrográfica e suas características hidráulicas; A modelagem hidrológica e hidráulica com a inclusão das informações representativas extraídas no pré-

processamento e informações tabulares de chuvas necessárias para geração das vazões e simulação do escoamento no curso do rio; e por último à calibração dos resultados encontrados em função dos níveis observados em medições reais. E ainda, à análise dos resultados encontrados através do mapa com às áreas suscetíveis a inundações do rio Bengalas.

5.1 Pré-processamento

Na etapa de pré-processamento da fisiografia às rotinas do Arc Hydro foram utilizadas para realizar a consistência do MDE da bacia hidrográfica, dividir a bacia do Rio Bengalas em sub-bacias e compor o banco de dados, conforme ilustra os resultados na Figura 7. Nela há os elementos da fisiografia extraídos do Modelo Digital de Elevação, onde: (a) são os valores atribuídos às células do MDE para definir a direção do escoamento da água, sendo determinada a direção de fluxo para cada célula, demonstrando dessa forma o caminho mais íngreme da célula; (b) este resultado mostra o

número de células acumuladas até determinado ponto, com essa acumulação é possível achar a área de drenagem à montante dessa, bastando para isso multiplicar esse número pela área da célula; (c) cada trecho de curso d'água é codificado em seções que conectam duas confluências sucessivas, uma confluência e seu exutório ou uma confluência e sua nascente; (d) Nesta etapa é feita a delimitação das bacias hidrográficas de todos os trechos de cursos d'água obtidos anteriormente da segmentação. Para isso, a rotina utiliza as informações da direção do fluxo juntamente com as ligações identificadas na segmentação na etapa anterior.

No presente artigo, a bacia hidrográfica do rio Bengalas foi subdivida em nove sub-bacias de interesse, conforme ilustra a Figura 8. A área total dessa bacia se próxima dos 188 km², dificultando a escolha do método de transformação da chuva-vazão, e pelo fato da declividade na parte alta ser muito forte com contribuições diferenciadas, distribuída espacialmente na bacia.

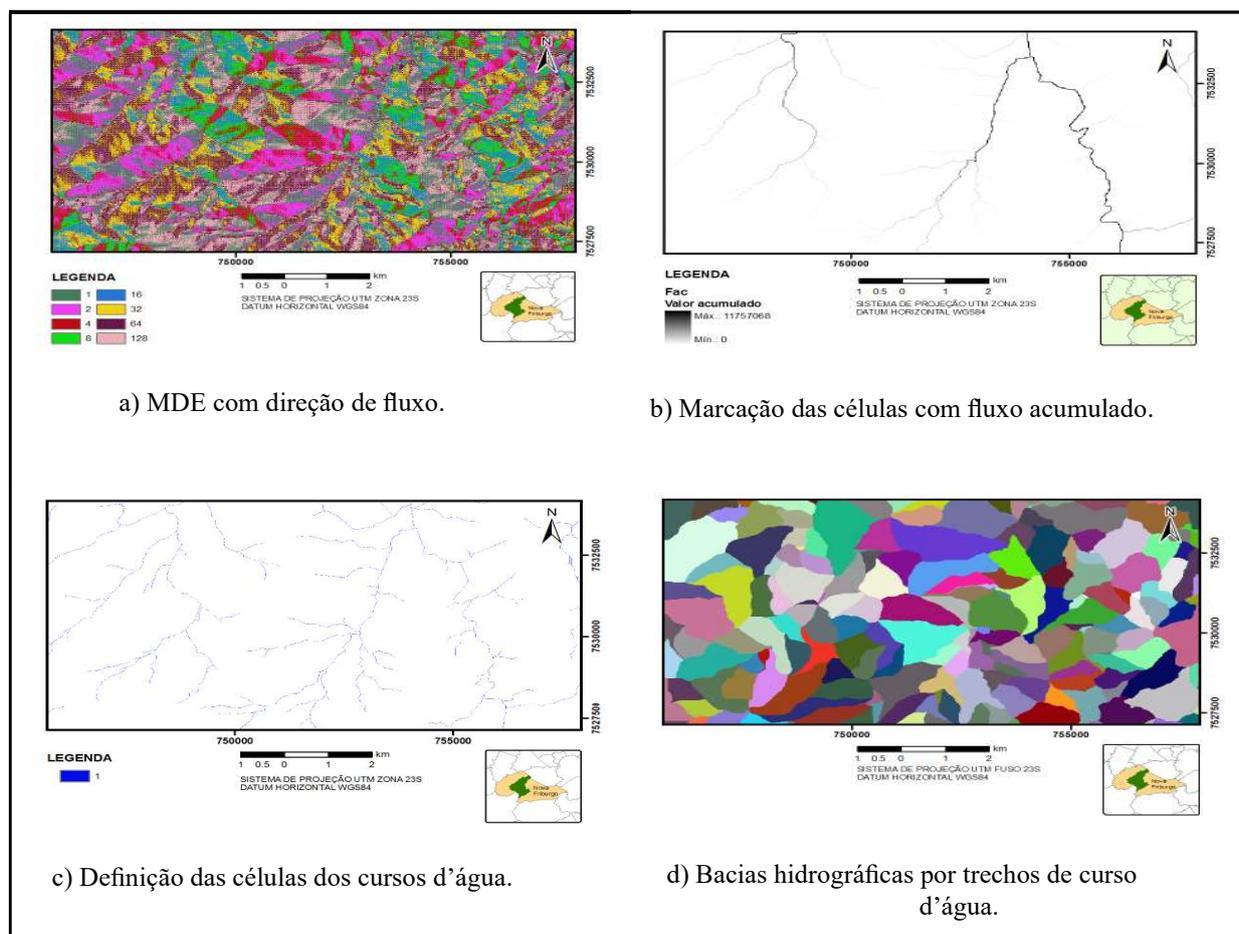


Fig. 7 - Elementos da fisiografia resultado do pré-processamento.

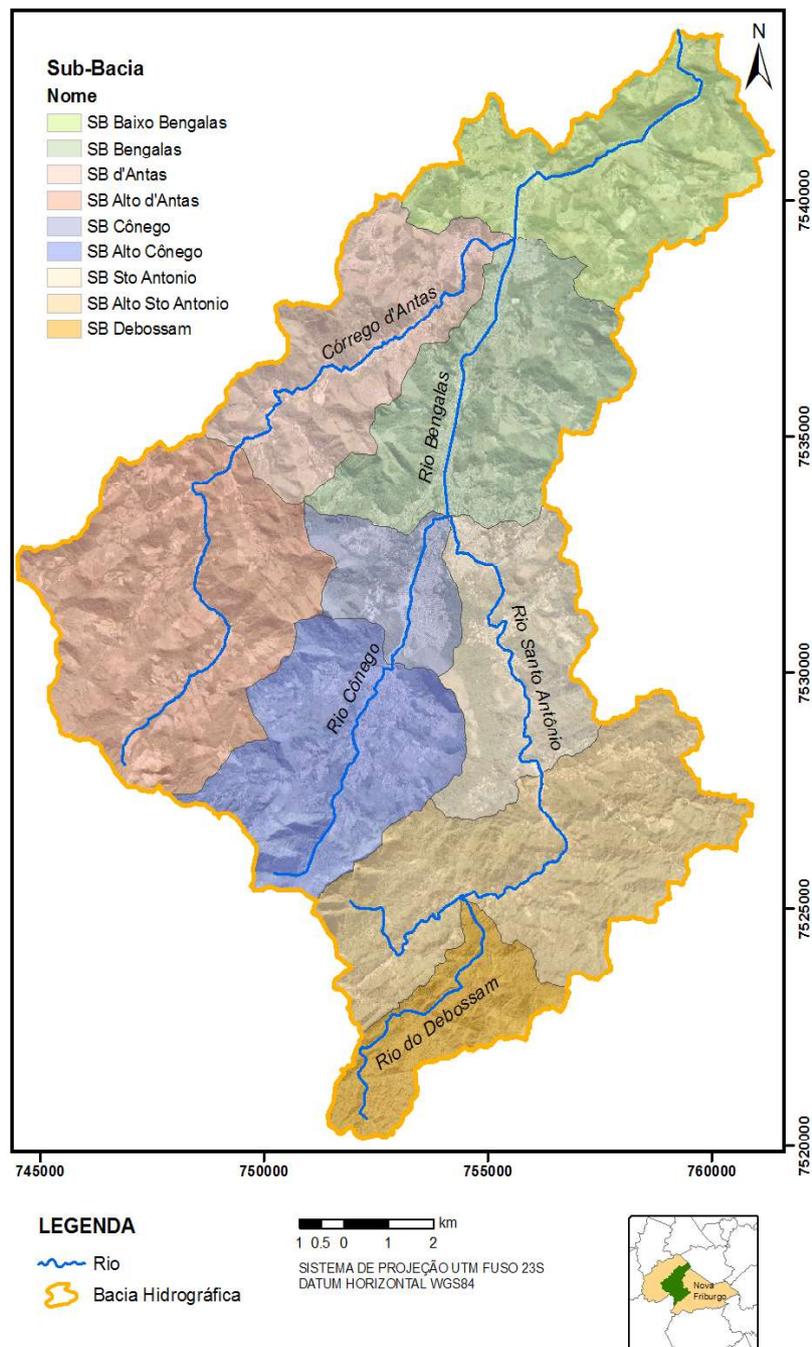


Fig. 8 - Sub-bacias e cursos d'água principais.

5.1.1 Características Hidrológicas

Além dos registros de precipitação dos postos de observação pluviométrica, também foi utilizada sua posição geográfica para criação do modelo meteorológico para ponderação da chuva média da bacia. Neste caso, utilizado a técnica do polígono de Thiessen, criados pelas redes de monitoramento do Sistema de Alerta de Cheia de Nova Friburgo e as da rede de Agência Nacional de Águas (ANA), foi determinado o CN (*Curve Number*). Para isso ser possível, se

fez necessário atualizar o tema de uso e ocupação do solo para o ano de 2006 com base em imagens ortorretificadas da área, com o intuito de discretizar as atividades na área urbana. Com destaque para a sua cobertura vegetal estimada de 57% de suas terras, contra 6,18% e 17% urbana e pastagem, respectivamente.

Outro parâmetro exigido para a modelagem hidrológica utilizando o modelo de transformação chuva-vazão é a área impermeabilizada. Neste estudo foi calculado também utilizando o mapeamento do uso e ocupação do solo, onde

temos que a proporção bacia do rio Bengalas impermeabilizada é de aproximadamente 10,51% de sua área. Observamos que a distribuição destes valores por sub-bacia, onde a do cônego tem cerca de (34,77%) já impermeabilizado, ou da bacia central de Nova Friburgo com 24,34%.

Considerando a associação de solo encontrou-se o LVAD2, com cerca de 30% da bacia, chegando a 35,19% com a área da cidade que está totalmente nesta classe. Quanto a classificação hidrológica o grupo predominante na bacia e o C com aproximadamente 45,6% da área total, lembrando que este é um solo que gera muito escoamento superficial, seguido de perto pelo solo tipo B com 35,19% da bacia.

Depois de realizada a estimativa inicial para parâmetro CN_0 por sub-bacia, encontrou-se $CN = 69,30$, em média, para a bacia inteira, e valores próximos de 72 para as sub-bacia do centro de Nova Friburgo e as do Cônego, com valores conforme a Tabela 3.

A determinação do tempo de concentração da bacia foi cuidadosa, uma vez que os picos de vazão obtidos pelo método do SCS são inversamente proporcionais ao tempo de concentração estimado para cada sub-bacia, adotando-se a equação de George Ribeiro, encontrando-se o tempo de pico (*lag time*) em torno de duas horas para as sub-bacias, exceto para as sub-bacias do Alto Cônego e Cônego, com 99,21 minutos e 70,02 minutos, respectivamente.

Os valores estimados encontram-se na Tabela 3, com o resumo das características físicas

levantadas e que foram utilizadas na Modelagem Hidrológica. Estas informações foram para o banco de dados e posterior transferência para o modelo hidrológico.

5.1.2 Características Hidráulicas

As geometrias básicas da modelagem da calha e áreas suscetíveis a inundações do rio Bengalas foram extraídos de um modelo digital de elevação em formato TIN. Depois da configuração do projeto, são elas as geometrias modeladas no geo-RAS: hidrografia, margens, direção do fluxo de escoamento, seções transversais, pontes, blocos de obstrução, barramento e diques. Algumas destas geometrias estão na Figura 9 a seguir: (a) encontram-se as camadas utilizadas para representar os rios e suas margens, usadas para diferenciar a área de transporte do canal principal da área da planície de inundação fora da calha; (b) as seções transversais, além de extraírem informações da seção do rio diretamente do MDT, guardam informações de outras camadas, por exemplo, o valor do coeficiente de Manning's; (c) ela deve estar entre duas seções transversais e devem constar também atributos do tabuleiro; (d) esta representa uma forma linear que impede o fluxo lateral de água na planície de inundação; (e) a camada de uso do solo, foi utilizada para estimar o coeficiente de rugosidade de *Manning* das seções transversais ao longo do Rio Bengalas. Para isso, atribuir um coeficiente aos polígonos de acordo com o solo e uso e ocupação.

Tabela 3: Características físicas da bacia hidrográfica

| Sub-Bacia | Bacia | | | | Rio | | Tempo de Concentração (min.) | Tempo de Pico (min.) |
|--------------------|---------------|-------------------------|-----------------------|--------|-----------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| | Perímetro (m) | Área (km ²) | Declividade Média (%) | CN_0 | Comprimento (m) | Declividade (m/m) | | |
| Debossam | 23,31 | 10,24 | 38,16 | 62,34 | 7518,16 | 0,055 | 132,11 | 79,26 |
| Alto Santo Antônio | 44,38 | 31,55 | 38,35 | 66,92 | 9577,99 | 0,032 | 171,19 | 102,71 |
| Santo Antônio | 27,22 | 16,52 | 37,72 | 67,23 | 8299,80 | 0,017 | 147,28 | 88,37 |
| Alto Cônego | 27,97 | 21,42 | 38,74 | 71,34 | 6447,26 | 0,094 | 99,21 | 59,52 |
| Cônego | 17,19 | 7,96 | 33,82 | 71,18 | 3947,91 | 0,007 | 70,02 | 42,01 |
| Bengalas(centro) | 31,54 | 23,77 | 31,95 | 71,62 | 6712,95 | 0,009 | 120,36 | 72,22 |
| Alto d'Antas | 33,20 | 33,81 | 35,47 | 71,91 | 9745,45 | 0,056 | 170,82 | 102,49 |
| d'Antas | 30,63 | 19,29 | 35,05 | 68,16 | 10185,55 | 0,017 | 182,47 | 109,48 |
| Baixo Bengalas | 35,54 | 23,14 | 39,03 | 73,06 | 8008,23 | 0,024 | 142,76 | 85,66 |

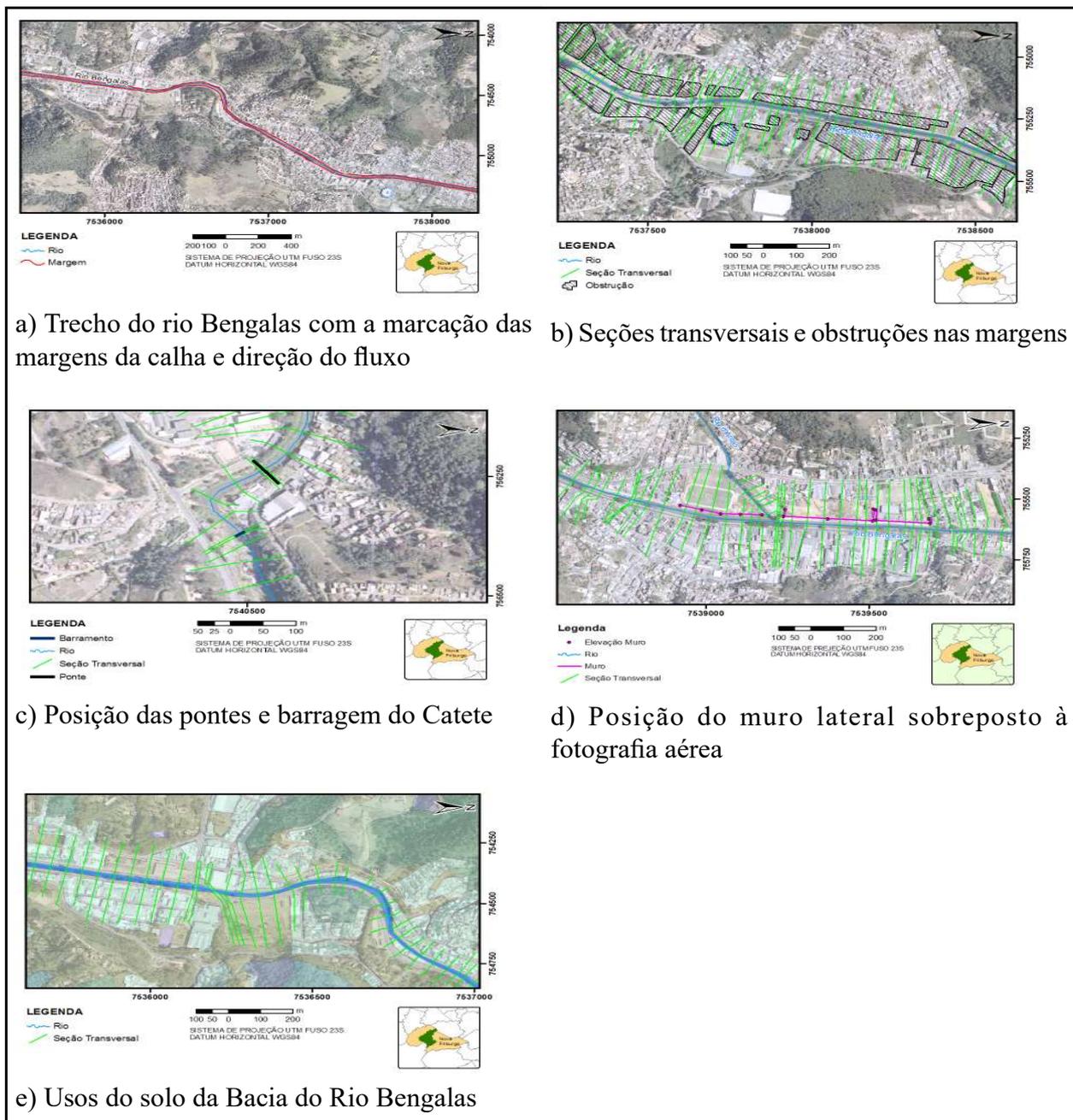


Fig. 9 - Geometrias resultado do pré-processamento. Fonte: IBGE (2006); Nova Friburgo (2007).

O único rio modelado foi o Bengalas, no seu trecho urbano, pois os rios Santo Antônio e Cônego só dispõem de uma única seção cada que ficam na ponte na confluência com o rio Bengalas.

A camada das seções é uma das mais importantes, pois leva para o modelo hidráulico as informações sobre a calha do canal e planície de inundação, extrai informações do coeficiente de *Manning*. Ela também intercepta outras geometrias que se encontram nas margens, como: bloco de obstrução e muros das laterais do rio.

Outra camada importante é a que contém

o uso do solo, neste caso associado a coeficiente de rugosidade n de *Manning*. A escolha deste n influencia nos resultados na altura da linha d'água. O problema é definir este coeficiente sobre a atuação de diversos fatores, como, a rugosidade da superfície, vegetação; irregularidade do canal entre outras. Os coeficientes de rugosidade adotados, no estudo hidráulico, ao longo e na calha do rio Bengalas estão na Tabela 4.

5.2 Modelagem Hidrológica e Hidráulica

Adotou-se o modelo de separação de chuva efetiva do *Soil Conservation Service*,

implementado no HEC-HMS versão 3.4, empregando o parâmetro (CN); juntamente com técnica do hidrograma unitário, também do SCS, para concentração do escoamento superficial;

e método de *Muskingum* para propagação da onda de cheia; e os dados processados no SIG, já comentados anteriormente.

Na modelagem hidráulica adotou-se o

Tabela 4: Coeficientes de Manning adotados no estudo

| Descrição do Uso | Valor (n) | Descrição do Uso | Valor (n) |
|------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| Espaços Abertos | 0,070 | Área Impermeável não Classificada | 0,080 |
| Estacionamento | 0,045 | Área Industrial | 0,080 |
| Estrada Pavimentada | 0,013 | Área Institucional | 0,100 |
| Estrada de Terra | 0,025 | Agricultura | 0,060 |
| Eucaliptos e Pinheiros | 0,150 | Bosque | 0,017 |
| Floresta | 0,180 | Campo de Futebol | 0,030 |
| Floresta Inicial e Média | 0,050 | Canal Concreto | 0,015 |
| Lago | 0,070 | Canal Natural | 0,035 |
| Lote Urbano - densidade Alta | 0,080 | Edificações | 0,015 |
| Brita e Argamassa | 0,018 | Cemitério | 0,017 |
| Pastagem | 0,030 | Poucas árvores e Arbustos | 0,060 |
| Área Comercial-Escritório | 0,100 | Passagem D'água | 0,030 |
| Área Degradada | 0,023 | | |

Fonte: Chow (1964) e USACE (2010).

regime permanente gradualmente variado (*steady flow*), calculado pelo *standard step method* com condição de entrada profundidade normal a jusante e montante (*Normal Deph*) e regime de escoamento misto (*mix flow*) implementados no HEC-RAS 4.1.0.

Foram utilizados registros vindos de dois sistemas de monitoramento, um operado pelo INEA e o outro pela ANA. Os registros do INEA são referentes à chuva e nível em intervalos regulares de 15 minutos provenientes de estações automáticas do Sistema de Alerta de Cheias de Nova Friburgo, disponível entre jan/2009 a jan/2011. Destes registros, foram selecionados três eventos: Chuva 1, utilizado para calibrar o parâmetro CN do modelo chuva-vazão, e os demais, Chuva 2 e 3, na validação da modelagem, conforme descrito na Tabela 5.

Os outros registros são das séries históricas de chuva da ANA e serviram para determinar as chuvas máximas, e posterior ajuste de distribuição de probabilidade para os tempos de recorrência de 10, 20 e 50 anos. Estes ajustes não foram apresentados por causa do número de repetições: por estação e por tempo de retorno,

para consulta ver Correia (2011). Neste caso, a distribuição Log-Normal tipo III foi a que se melhor se ajustou aos dados dos valores máximos, exceto, na estação Vargem Grande (2042020) para o tempo de retorno de 50 anos, onde considerando o menor Erro padrão, o melhor ajuste aos dados foi a Log-Normal II. Ver Tabela 6 a seguir.

Os resultados de precipitação encontrados para os tempos de recorrência definidos foram discretizados pelo método de Huff (1990) e corridos para uma chuva de 24 horas conforme (TORRICO, 1975), antes de entrarem no modelo de transformação chuva-vazão na forma de um hietograma.

5.3 Calibração e Simulação

Concluída a fase de construção e implementação dos modelos hidrológico e hidráulico, passamos para verificação destes modelos.

Procedeu-se primeiramente a calibração do modelo hidrológico em função dos resultados da transformação da chuva em vazão para os valores de CN encontrados e posterior

Tabela 5: Precipitação acumulada no período por estação pluviométrica

| Evento | Chuva 1 | Chuva 2 | Chuva 3 |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| Estações/Data | 27/01/2009 20:00 | 21/01/2009 18:00 | 27/05/2009 12:00 |
| | 28/01/2009 08:00 | 22/01/2009 12:00 | 27/05/2009 23:45 |
| Conselheiro Paulino | 63,6 | 40,2 | 0,0 |
| Nova Friburgo | 60,6 | 58,6 | 23,2 |
| Olaria | 65,4 | 63,8 | 27,6 |
| Pico Caledônia | 67,0 | 141,6 | 51,0 |
| Sta. Paula | 58,6 | 45,0 | 20,0 |
| Ypú | 63,0 | 69,4 | 26,4 |
| Média | 63,0 | 69,8 | 24,7 |

Fonte: Sistema de Alerta de Cheia, INEA (2010).

Tabela 6: Resumo dos valores de precipitação calculada para os tempos de recorrência de 10, 20 e 50 anos

| Estação | | Tempo de Recorrência | | |
|---------|----------------------|----------------------|--------|--------|
| Código | Nome | TR10 | TR20 | TR50 |
| 2242005 | Faz. São João | 157,41 | 169,33 | 182,76 |
| 2242024 | Teodoro de Oliveira | 145,89 | 155,10 | 165,55 |
| 2242025 | Cascatinha do Cônego | 128,54 | 141,59 | 156,63 |
| 2242020 | Vargem Grande | 112,48 | 125,10 | 146,19 |
| 2242022 | Faz. Mendes | 108,78 | 118,53 | 129,58 |
| 2242021 | Bom Jardim | 105,65 | 113,81 | 123,17 |

verificação do nível alcançado por essa vazão no modelo hidráulico do rio Bengalas na seção de referência.

A seção de referência adotada para comparação dos níveis calculados com os observados foi a estação de monitoramento (2242120) chamada Nova Friburgo, do Sistema de Alerta de Cheias, no centro da cidade, com a cota de fundo na cota 839,8m e transbordando para níveis superiores a 4,70m na cota 844,5m.

Primeiro foi feita uma simulação com os dados das estimativas inicial dos parâmetros físicos da bacia. Os resultados encontrados nesta primeira simulação gerou um escoamento com o nível incompatível com a medição observada na estação de referência, ficando este em torno de 47% (4,4m) acima do nível registrado no evento chuva 1 que é de 3,0m.

Para compatibilizar os níveis das linhas d'água do modelo hidráulico com os observados na estação de referência foi então otimizado o parâmetro CN, no caso, efetuando uma redução gradativa dos valores encontrados nas estimativas iniciais visto que estes geraram

um pico de vazão muito elevado. Repetindo-se esse procedimento chegamos a um valor que compatibilizou os níveis observados e calculados, redução está, em média de 16% do CN_0 . Assim, o valor médio no CN para a bacia do rio Bengalas foi estimado em 58, e os valores por estimados por sub-bacia são: SB Bengalas (61), SB Alto d'Antas (62), SB Alto Santo Antônio (54), SB Baixo Bengalas (57), SB do Córrego d'Antas (61), SB Debossam (50), SB Santo Antônio (55), SB Cônego (60) e SB Alto Cônego (60).

Após o ajuste do CN em função da chuva e nível do evento chuva 1, os outros eventos, chuva 2 e chuva 3, serviram para validar os novos CN's. Na validação, utilizando os CN's ajustados, o nível da linha d'água encontrado calculado foi apenas 4,0% maior do que o observado (nível observado 3,75m contra 3,90m calculado) para um evento no mesmo mês de referência da calibração. Essa diferença aumentou para 22,9% (nível observado 1,79m contra 2,20m calculado) para um evento mais afastado do mês da ocorrência do evento chuva

1, utilizada na calibração, indicando possível variação sazonal nos valores estimados para o CN.

Após a calibração dos modelos foram realizadas simulações utilizando as chuvas geradas pela hidrologia com base no estudo estatístico das séries de chuva das estações de monitoramento da ANA, para os tempos de recorrência de 10, 20 e 50 anos. Este modelo hidrológico foi ponderado pelo polígono de Thiessen com as estações da ANA e utilizado como entrada os parâmetros de CN encontrados na calibração. O procedimento de cálculo é

similar ao realizado na calibração, cujas vazões encontradas estão resumidas na Tabela 7 para os três tempos de recorrência.

Além das funcionalidades, já expostas, o geo-RAS, também é capaz de levar os resultados da modelagem hidráulica para o ambiente SIG. No presente artigo, os resultados da simulação da linha d'água tanto dos procedimentos de calibração, validação e simulação foram importados para um banco de dados espacial, no entanto, apenas os resultados gerados pelos eventos extremos, geradas pelas chuvas das estações da ANA, foram estudados.

Tabela 7: Resultados da transformação chuva-vazão (m³/s) do modelo hidrológico para os tempos de retorno de 10, 20 e 50 anos

| Elementos | TR 10 | TR 20 | TR 50 |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| Rio Santo Antônio | 48,9 | 57,5 | 67,9 |
| Rio Cônego | 30,1 | 35,9 | 42,9 |
| Rio Bengalas (centro) | 100,3 | 119,5 | 144,9 |
| Córrego d'Antas | 39,0 | 47,0 | 56,8 |
| Rio Bengalas | 179,7 | 216,0 | 266,8 |

5.4 Áreas susceptíveis a inundações

Analisando os resultados encontrados, verificou-se que a seção do rio Bengalas não comportar a vazão de cheia de 10 anos, pois, apresentaram locais onde houve escoamento pelas margens.

Conforme Figura 10, para as três superfícies geradas na simulação, graficados no mapa, todos têm pontos em comum de transbordamento, desde a ponte da rua Henrique Zamith seguindo até a rua Antônio Joaquim de Macedo Soares com a avenida Governador Roberto da Silveira, e em outro ponto, começando um pouco antes da confluência do Córrego d'Antas com o rio Bengalas, em Conselheiro Paulino, esse último com uma grande extensão de área inundável.

Dois locais onde houve transbordamento destacam-se pelo alcance da planície de inundação encontradas na modelagem. O primeiro ponto fica no centro. Verificando o levantamento topográfico observa-se que se

trata de uma depressão do terreno, mas, pode estar relacionada também a existência de duas pontes muito próximas, uma análise visual da estrutura delas mostra que a posição dos pilares dentro do rio reduzindo sua seção do canal. Já o segundo ponto fica em conselheiro Paulino, essa planície de inundação receber a vazão do córrego d'Antas, estimada para 50 anos de 56,8 m³/s somados ao volume escoado pelo rio Bengalas, naquela seção, de aproximadamente 144,9 m³/s.

Fazendo a interseção das áreas suscetíveis a Inundações para chuva de 50 anos de recorrência com o uso e ocupação em 2006, observou-se que 46%, maior parte dela, está ocupada por áreas edificadas, que dá em termos absolutos 0,56 km², seguido pelas áreas não ocupadas nas margens com 0,32km² (26%) e o canal do Bengalas e suas vias laterais, 0,18 km² e 0,17 km² respectivamente, que dá em torno dos 14% cada.

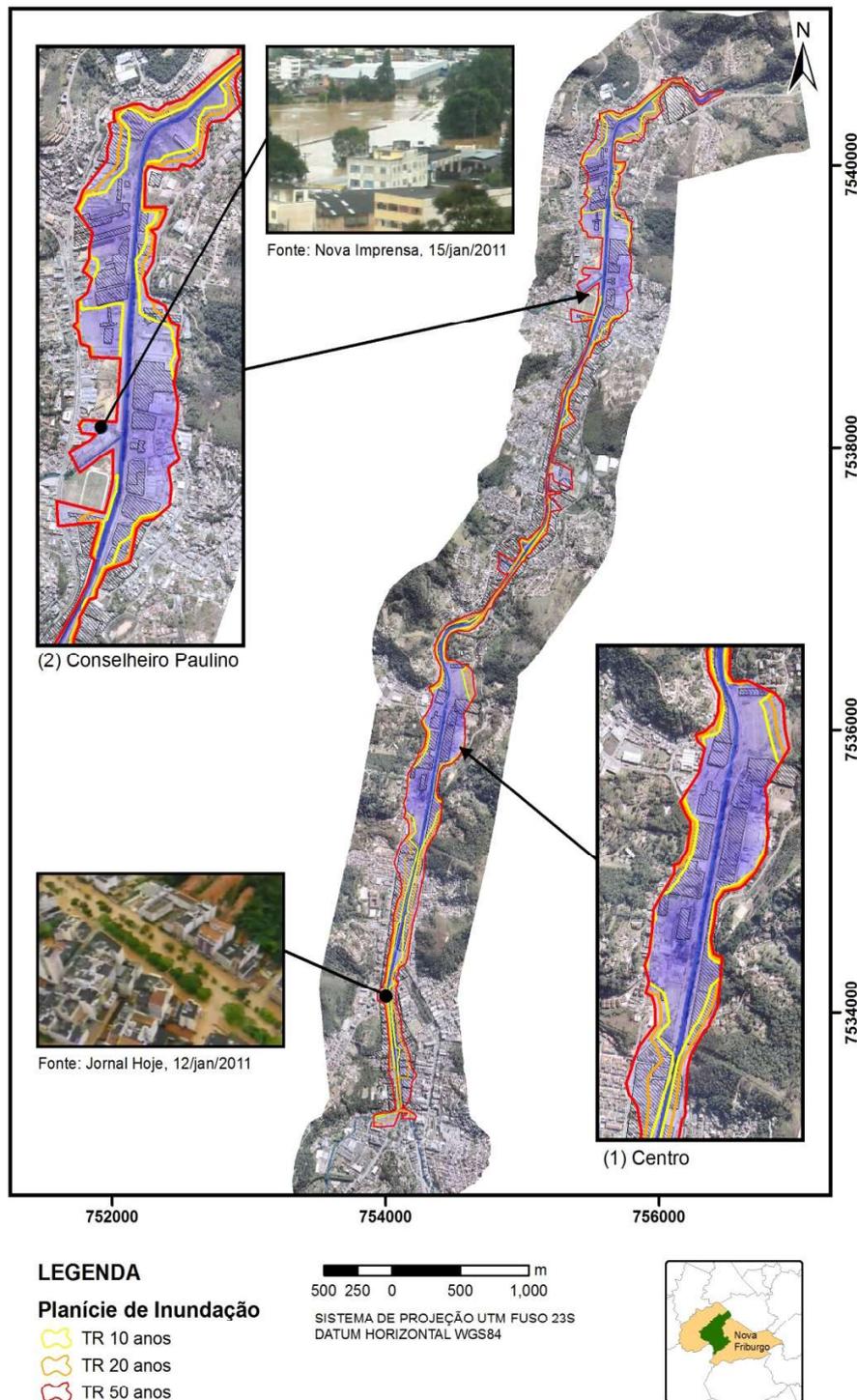


Fig. 10 - Sobreposição das áreas suscetíveis a Inundações do rio Bengalas, trecho do centro da cidade de Nova Friburgo, para os tempos de retorno de 10, 20 e 50 anos. Fonte: IBGE (2006); Nova Friburgo (2007).

6. CONCLUSÃO

Os resultados computacionais obtidos permitem concluir que a metodologia proposta é adequada ao problema, além disso, a utilização do ferramental do geoprocessamento, para espacialização dos eventos de cheias teve

fundamental importância para a modelagem do problema do Rio Bengalas em nova Friburgo.

Atualmente a utilização de Sistemas de Informação Geográfica, juntamente com técnicas de geoprocessamento, permite que o levantamento e o processamento dos dados sejam realizados mais rapidamente, exigência, muitas

vezes, da dinâmica do próprio evento modelado, possibilitando a obtenção de resultados mais consistentes, confiáveis e de fácil validação.

A partir das análises dos resultados conclui-se que o rio Bengalas não suporta escoar volumes decorrentes de precipitações associadas aos tempos de recorrência estudados 10, 20 e 50 anos. Tendo em vista esta constatação, utilizando-se geotecnologias para traçar as áreas de inundação associadas aos referidos tempos de recorrência. Considerando-se o caso mais extremo, para uma chuva de 50 anos de recorrência, a área inundável fica próxima de 1,0 km² distribuída nos seus 8,5 km, do centro até a barragem do Catete, e que, no ano de 2006 estava prioritariamente ocupada.

Em virtude dos resultados alcançados neste estudo, é recomendável o seu prosseguimento, pois outros fatores, tais como: modificação das condições da bacia hidrográfica, com cenários diferentes de uso e ocupação do solo e o aumento da urbanização ou processo de reflorestamento podem ainda ser estudados com esta metodologia. Para o seu prosseguimento, torna-se necessário antes a atualização das seções da calha do rio Bengalas, visto que está passando por obras no período entre 2009, 2010 e ainda estão em andamento desde 2012 projetos que visam melhorar as condições de escoamento do rio Bengalas e seus afluentes, obras estas, que implicam diretamente em sua condição de escoamento e demandaria a entrada no modelo desta nova configuração.

Outra simulação que pode ser realizada diz respeito às inundações ocorridas em janeiro de 2011, para isso, se faz necessário à disponibilização das precipitações consistidas pelas operadoras da rede hidrometeorológica, para que estes dados pudessem ser considerados no cálculo do tempo de recorrência.

Existem outros meios para delimitar as áreas suscetíveis a inundações, como é o caso das marcações das cotas alcançadas pelas inundações. A utilidade deste método está na previsibilidade de eventos menores ou iguais as que deram origem as marcas.

Os estudos que envolvem riscos devem contar com a probabilidade de ocorrências destes eventos. Associadas a probabilidades de ocorrência, as simulações trazem parâmetros de referência para garantir que quando eventos

de grande magnitude ocorram, a cidade tenha uma infraestrutura compatível para superá-los com menos dificuldade. No caso deste estudo, utilizando os recursos das geotecnologias, podemos ir além, e termos uma prévia da abrangência das planícies de inundações para os mais variados riscos de ocorrência e potencial causador de danos, assim sendo, este método demonstra ser vantajoso para prever catástrofes climáticas que envolva risco de inundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Hidroweb**: Sistema de Informação Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em agosto de 2010.

BAPTISTA, Alessandra Carreiro. 2011. Formato JPEG. 2 fotografias, color. Coleção particular

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; IPT. 2007. 179 p. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoErradicacao/Livro_Mapeamento_Enconstas_Margens.pdf>. Acesso em: setembro 2009.

CASTRO, A.L. de; MOURA, A. Z. B.; CALHEIROS, L. B. **Glossário de Defesa Civil Estudos de Riscos e Medicina de Desastres**. 5 ed. SEDEC. 5 ed. Brasília: SEDEC, 2008. 191 p.

CHOW, V. T. **Open-Chanel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1964. 661 p.

CORREIA, E. F. G. **Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, Rj, Utilizando o Potencial de Geotecnologias na Definição de Áreas de Risco de Inundação**. Rio de Janeiro: UERJ, 2011. 299p.: il.; Dissertação (Mestrado) - UERJ/ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Computação, 2011.

FUNDAÇÃO D. JOÃO VI DE NOVA FRIBURGO. **Projeto Centro de Documentação D. João VI**-Pró-Memória de Nova Friburgo. Nova Friburgo, 2010. 2 fotografias, p&b. Disponível em: <<http://www.djoaovi.com.br/index.php?cmd=section:acervo>>. Acesso em: janeiro de 2011.

- HUFF, F. A. **Time Distributions of Heavy Rain storms in Illinois**. Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173, 1990. 22 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Projeto RJ25**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/download/geociencias.shtm>. Acessado em janeiro de 2010.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE - INEA. **Sistema de Alerta de cheia de Nova Friburgo**. Rio de Janeiro: 2010. Disponível em: <<http://inea.infoper.net/inea/>>. Acesso em janeiro de 2011.
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.S.F.; RUDORFF, F.M. 2006. **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/publicacoes.html>>. Acesso em setembro de 2010.
- MAINDMENT, D. **Arc Hydro GIS for water resources**. Redlands, California-USA: ESRI Press, 2002. 203p.
- NOVA FRIBURGO. Plano de Águas Pluviais de Nova Friburgo-PAPNF. **Tomo IV – Canalização do rio Bengala**. São Paulo: FCTH, 2007. 85 p.
- PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. – **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Reimpressão. Porto Alegre: ABRH, 2003. 628 p.
- PONCE, V. M. **Engineering Hydrology: Principles and Practices**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. Disponível em: < http://ponce.sdsu.edu/330textbook_hydrology_chapters.html >. Acesso em: 13 de junho 2009.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: _____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. UFRGS, 2009. Cap. 2, p. 35-51.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p.
- TORRICO, J. J. T. **Práticas Hidrológicas**. TRANSCON: Rio de Janeiro.1974. 120 p.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. Coleção ABRH.
- US Army Corps of Engineers-USACE. **GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension -user's Manual**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA. 2009a. 197 p. Disponível em: < <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/> >. Acesso em junho de 2010.
- US Army Corps of Engineers-USACE. **HEC-geoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS Using ArcGIS - User's Manual. Hydrologic**. Engineering Center, Davis, CA, USA. 2009b. 246 p. Disponível em: < <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/> >. Acesso em junho de 2010.
- US Army Corps of Engineers-USACE. **HEC-RAS River Analysis System - Reference Manual. Hydrologic**. Engineering Center, Davis, CA, USA. 2010. 411 p. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx> >. Acesso em abril de 2010.
- WARD, R. **Floods: A Geographical Perspective**. 1. ed. New York: Jonh Wiley & Sons. 1978. 244 p.