

# MODELAGEM HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL DAS ZONAS URBANAS INUNDÁVEIS EM GOVERNADOR VALADARES / MG

*Rubens Gomes Dias Campos<sup>1</sup>, Márcio Benedito Baptista<sup>2</sup>*

**RESUMO** – A utilização de modelos hidráulicos computacionais para representação de manchas de inundação em meios urbanos tem grande importância para delimitação de zonas naturalmente alagáveis, possibilitando a ocupação planejada e o suporte para sistemas de alerta em cidades que já se encontram implantadas em leitos maiores de grandes rios, com risco de inundação durante períodos chuvosos. Esta pesquisa insere-se neste contexto, visando à identificação de coeficientes de rugosidade associados a diferentes tipos de ocupação urbana e a comparação entre dois diferentes cenários de modelagem unidimensional. O estudo foi realizado com base no caso da cidade de Governador Valadares, em Minas Gerais, realizando-se as simulações em regime permanente com o uso do modelo HEC-RAS 4.0. A calibração e validação dos coeficientes de Manning foram realizadas com dados relativos a quatro séries de vazões e alturas de linha de água observadas. A avaliação comparativa das manchas de inundação simuladas com os dois diferentes níveis de detalhamento com os dados efetivamente observados permite discernir as características de precisão, representatividade e praticidade das duas hipóteses de modelagem.

**ABSTRACT** – The use of computational hydraulic models to represent the flood delineation in urban scenarios are very important to draw the naturally inundation area, making possible a designed occupation and the use in support to the alert system to cities that are already installed in floodplain of rivers with large watersheds, with higher inundation risk during the raining seasons. This research is inserted in this context, aiming to identify roughness coefficients values associated to different land uses and the comparisons between two one-dimensional models. The research was developed for the city of Governador Valadares, Minas Gerais, using the steady flow analysis approach of HEC-RAS 4.0. It was used a calibration and validation of Manning coefficient values, associated to four flows and water level observed data. The comparative evaluation of the floodplain delineation, obtained with the two different detailed models, and the effective observed data, allowed discerning the characteristics of precision, representativity and practicality of the two hypothesis.

**Palavras-chave:** Inundações em meios urbanos, modelagem hidráulica computacional, coeficientes de Manning de áreas urbanizadas.

---

1) Mestrando em Engenharia de Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Hidráulica da UFMG, e-mail: rgcampos@golder.com.br.

2) Professor adjunto do Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Hidráulica da UFMG, e-mail: marcio.baptista@ehr.ufmg.br.

## 1 – INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos o homem procurou a ocupação de planícies próximas a rios e áreas de fácil acesso à água para sua captação, uso potável, na agricultura e sanitário. Esta ocupação tem acarretado problemas de inundações que, com o passar do tempo intensificaram, de forma negativa, a redução da cobertura vegetal e conseqüente aumento da impermeabilização, interferindo nas parcelas do balanço hídrico Mascarenhas *et al.* (2000).

O desequilíbrio do balanço hídrico leva a um aumento de volume do escoamento superficial, e com a ocupação intensa das bacias chega-se ao cenário urbano caótico onde se sucedem as inundações. As áreas mais baixas das bacias urbanas são áreas mais susceptíveis às inundações, devido à sua proximidade, ou inserção, com o leito maior e assim com a planície de inundação. A ocupação desordenada de encostas também tem papel importante quando em períodos chuvosos relacionados a inundações, por anteciparem o pico de vazão e aumentá-lo, conjuntamente com outras áreas impermeáveis Mascarenhas *et al.* (2000).

Inseridos em um meio artificial os rios, em leitos naturais ou canalizados, em áreas urbanas, que se localizem em áreas aproximadamente planas, têm potencial para formar grandes áreas alagáveis Mascarenhas *et al.* (1999). Este potencial vem sendo agravado, uma vez que o meio urbano vem sofrendo, há muito tempo, a concentração da população. No Brasil, 81 % do total da população, já no ano de 2000, estava concentrado nas cidades Baptista *et al.* (2005).

As intervenções adotadas pela ciência da engenharia são as medidas de combate às enchentes, assim delineadas em dois grupos; as estruturais e não-estruturais.

As medidas estruturais envolvem um grande investimento e manutenção, por se tratarem da execução de estruturas de grande porte, e assim, se tornando onerosas.

Outra estratégia desenvolvida pela engenharia, aplicada à ocupação urbana, foi à delimitação de áreas onde o risco hidrológico, relacionado à segurança efetiva da população e equipamentos, seja menor. São as chamadas áreas *non aedificandi*, definidas a partir da modelagem matemática, a qual permite a delimitação de áreas alagáveis. Possibilita-se, desta forma, o zoneamento de planícies de inundação, de acordo com o risco pretendido. Talvez seja a medida mais interessante e inteligente em relação à concepção do equipamento urbano, pois permite um arranjo ambientalmente correto e prognóstico de ocupação.

Outra possibilidade para o uso das informações sobre manchas de inundação é a criação e implantação de um sistema de alerta em tempo real. Esta é uma opção que pode ser onerosa, pois implica em maior dificuldade técnica de implantação e manutenção, pela própria operação de um sistema que envolve previsão e simulação matemática, como também pela operação, pois requer movimentação de pessoas e bens. Porém, pode ser muito útil, principalmente para poupar a

população residente de maior sofrimento e exposição ao perigo, e podendo ser aplicada a meios urbanos já desenvolvidos, como é o caso da cidade Governador Valadares, em Minas Gerais, adotada para o estudo de caso desta pesquisa.

Assim, a correta delimitação das áreas de inundações é um passo muito importante para orientar os urbanistas e, assim, possibilitar a delimitação das áreas *non aedificandi*, para que não haja desperdício do espaço urbano, bem como para garantir a não exposição de vidas humanas e bens ao perigo. A constatação destes fatos conduz ao desenvolvimento desta pesquisa, que busca trazer uma contribuição para a engenharia hidráulica.

Baptista *et al.* (2005), estimaram um valor de dois bilhões de dólares com despesas e prejuízos anuais com inundações. Segundo Tucci (2000, *apud* Baptista *et al.*, 2005) o valor estimado é da ordem de um bilhão de dólares.

Neste contexto, na maioria das vezes, a ocupação urbana ocorre sem que haja o devido acompanhamento necessário da infra-estrutura que deveria estar associada a esta ocupação, ou seja, as condições mínimas de planejamento geral não costumam ser atendidas. Fato que gera importantes reflexos sobre a comunidade que ocupa áreas inundáveis.

A ferramenta que permite a definição sobre qual área deve ser contemplada com uma obra para controle de inundação, ou delimitação de áreas *non aedificandi*, é a modelagem matemática computacional, pois esta permite a adequada delimitação da área de interesse. Porém, por trás da modelagem matemática computacional se encontram as estruturas formais constituintes dos modelos matemáticos.

Segundo Mascarenhas *et al.* (2002), a determinação dos parâmetros, do coeficiente de rugosidade de Manning e do expoente do raio hidráulico, presentes na expressão da declividade da linha de energia, é tarefa de grande complexidade. Assim, deve-se proceder à calibração para se obter um modelo realmente representativo.

A partir deste ponto aparecem questões que podem ser determinantes para a segurança que uma obra pode proporcionar à população. Elas são relativas aos métodos adequados, ao nível de complexidade do problema e sua compatibilidade com o nível de refinamento do modelo.

Outro ponto são os parâmetros de calibração, e se estes parâmetros podem ser avaliados de forma global, com base na literatura hidráulica ou se existe a necessidade de uma calibração específica à interferência que equipamentos urbanos causam na calibração.

## **2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA**

A cidade de Governador Valadares está localizada na Bacia do Rio Doce, é uma das maiores cidades da região com, aproximadamente, 260.000 habitantes. Possui altitude média de 168,0 metros, clima quente com chuvas de verão, precipitação média anual de 1114,0 mm. As enchentes

na cidade ocorrem no período chuvoso, que começa em outubro e termina em março, e são registradas mais frequentemente de dezembro a fevereiro CPRM (2004). A cidade está localizada, em grande parte, na planície de inundação do rio Doce, sofrendo, em função disto, sérios e freqüentes problemas de inundação.

O rio Doce, em Governador Valadares, tem sua calha principal com largura de 550 metros em média, com a presença de Ilhas formadas pela deposição de sedimentos em locais onde a velocidade é baixa, pela ocorrência de regime subcrítico, com fixação de vegetação arbustiva sobre estas ilhas. Afloramentos rochosos ocorrem em várias partes do leito do rio e estes formam uma corredeira a jusante da Ilha dos Araújo. A declividade média do rio é de 0,08% e a área em estudo é aproximadamente 29,20 km<sup>2</sup>.

O principal fator causal das grandes magnitudes de inundações é a dimensão da área de drenagem, em torno de 40.000 km<sup>2</sup> Castilho *et al.* (2004), como se pode constatar pela Figura 1, ou seja, trata-se de uma questão de enchentes fluviais agravadas por implementação de equipamento urbano próximo a calha maior do curso d'água. O sistema de previsão e alerta existente alivia o problema em Governador Valadares, mas, ainda assim, a área pode ser considerada de alto risco.

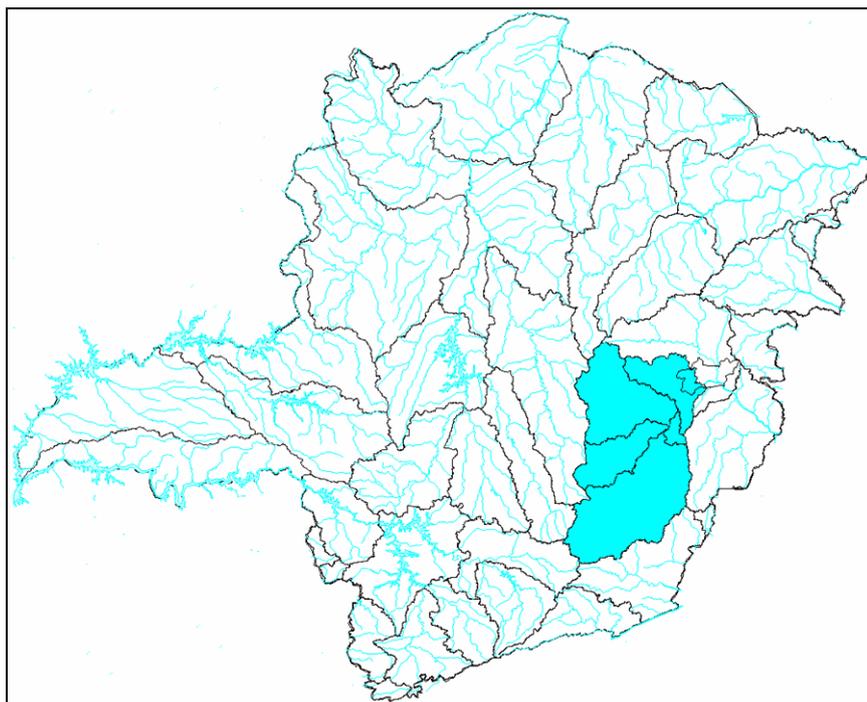


Figura 1 – Área de drenagem localizada em Governador Valadares.

A Figura 2 apresenta a localização do município de Governador Valadares no estado de Minas Gerais e o MDT (Modelo Digital do Terreno) utilizado para a pesquisa.

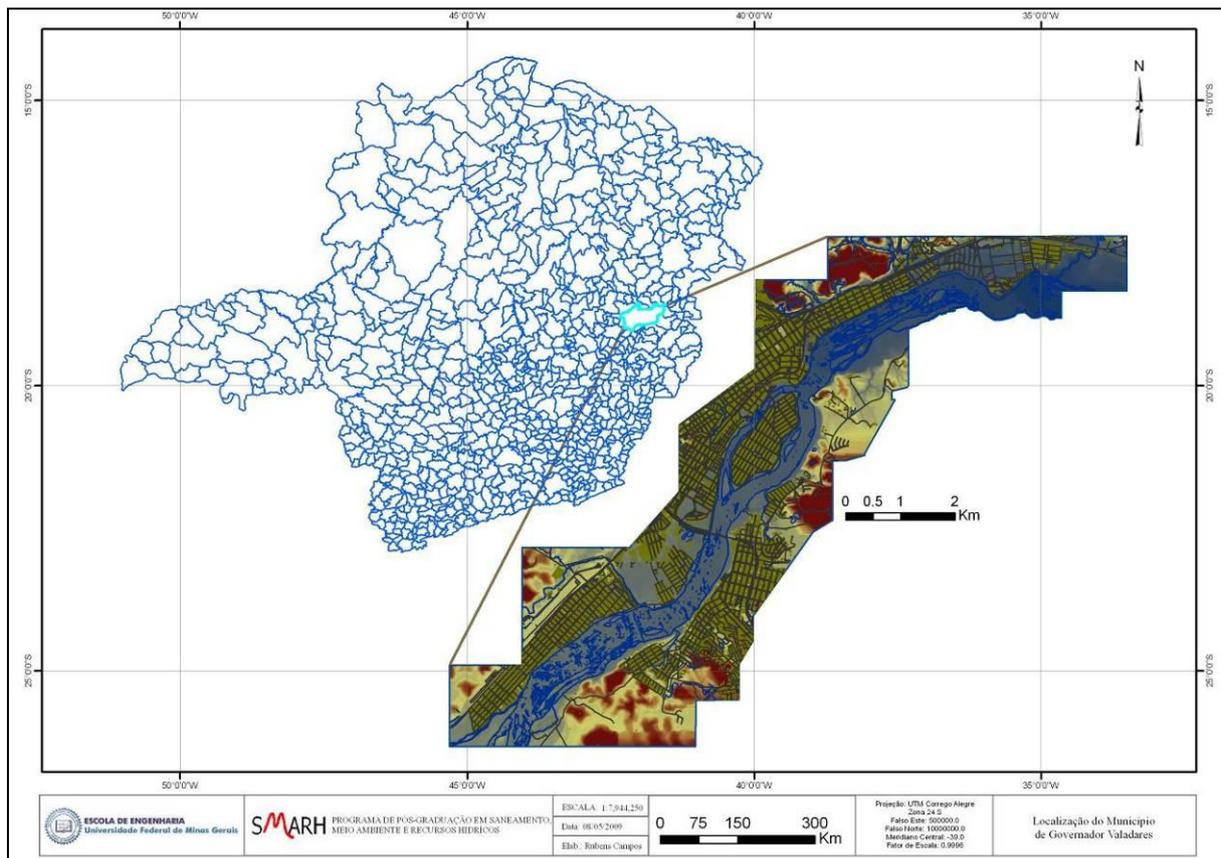


Figura 2 – Município de Governador Valadares e MDT da cidade (Escala Distorcida).

O trecho total compreendido para a pesquisa é de 16,20 km, somados os ramos esquerdo e direito da Ilha dos Araújo, ou 14,70 km se considerado o trecho linear do rio Doce. Os modelos possuem um total de 145 seções, das quais quatro se referem às pontes. A ponte da BR 116, localizada no trecho a montante da Ilha dos Araújo, e a ponte que liga a Ilha dos Araújo à margem esquerda do rio Doce.

A Figura 3 apresenta uma vista aérea da cidade de Governador Valadares.

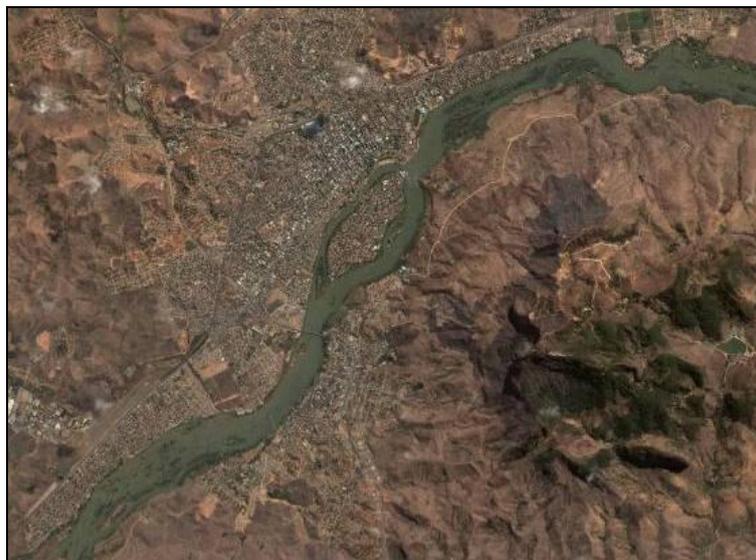


Figura 3 – Vista aérea da cidade Governador Valadares (fonte: Google Earth).

### 3 – METODOLOGIA

De forma a possibilitar a criação do modelo topológico foi utilizada uma ferramenta que perfaz a extração de informações georeferenciadas do MDT de Governador Valadares, que é o software HEC–GeoRAS 4.2, de formulação conjunta da *ESRI* e do *Hydrologic Engineering Center* USACE (2005), o qual permite a edição de camadas em software SIG (Sistema de Informações Georeferenciadas), ArcGIS 9.2, para representação das seções transversais, delimitação das margens esquerda e direita e canais principais, distância entre as seções transversais, e demais informações topológicas necessárias. Estas informações são referentes à topografia da cidade de Governador Valadares e foram exportadas para o software de modelagem computacional hidráulica HEC–RAS 4.0, onde foram complementadas com informações batimétricas da calha do rio Doce, e passaram por um detalhado trabalho de consistência.

Os dados topobatimétricos foram obtidos junto ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM, conjuntamente com dados de monitoramento hidrométricos, compreendendo oito valores de vazões CPRM (2004). Dados de topografia e auxílio para a visita a campo foram providenciados pela Prefeitura Municipal de Governador Valadares. O MDT e a delimitação dos quarteirões para a área modelada encontram-se apresentados na Figura 4.

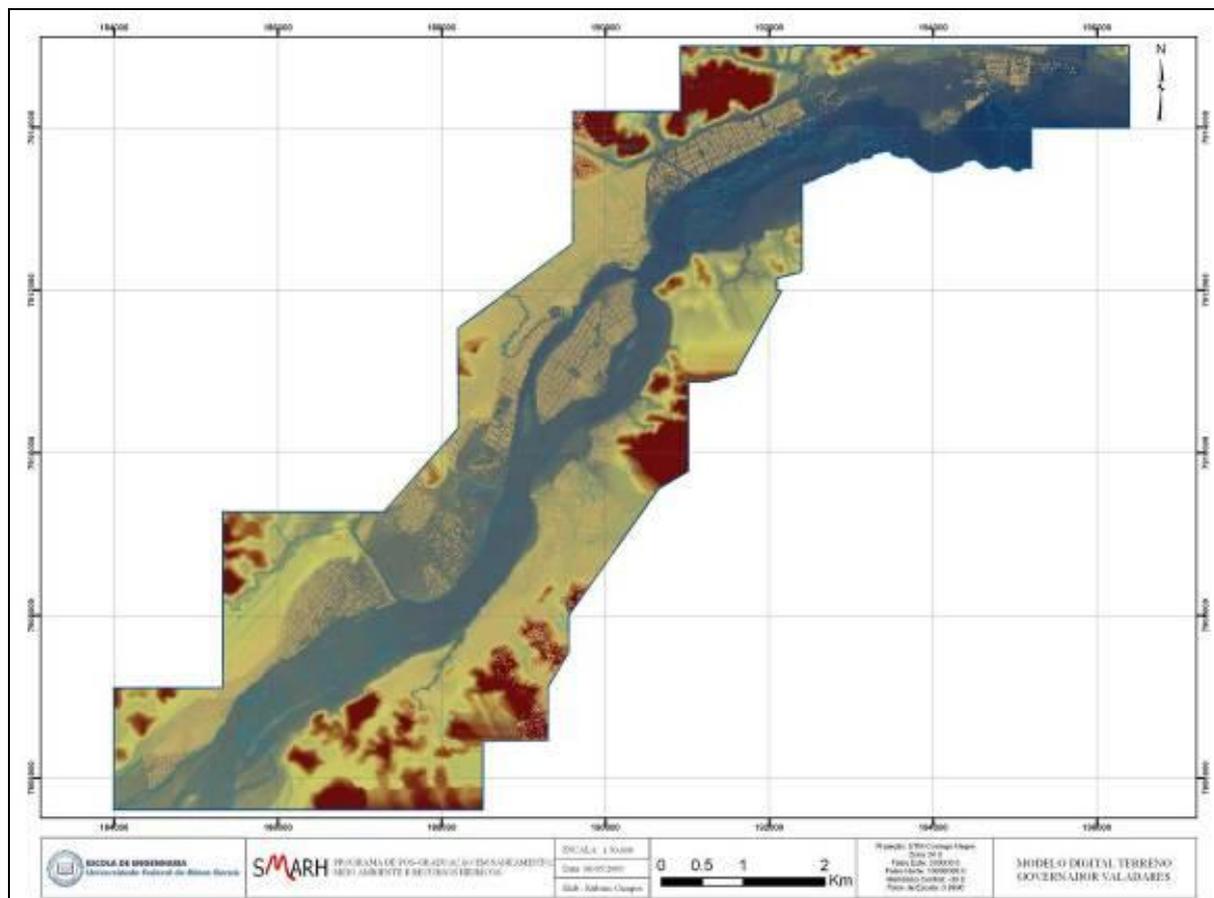


Figura 4 – MDT de Governador Valadares (Escala Distorcida).

Inspeções de campo foram realizadas no período de 19/10/2006 a 21/10/2006. Estas foram realizadas com intuito de se conhecer, *in loco*, as características de uso do solo das áreas atingidas pelas cheias, de forma a identificar as tipologias homogêneas e associá-las aos coeficientes de rugosidade de Manning. Efetuou-se também a inspeção e caracterização de singularidades no leito fluvial e a visita aos equipamentos de monitoramento fluviométricos.

A finalidade da modelagem nesta pesquisa é avaliar a interferência causada pelos equipamentos e benfeitorias urbanas. Assim são criados dois cenários. O primeiro cenário é composto pela topografia e batimetria somente em nível de alto detalhamento. O segundo cenário possui a representação da topografia e batimetria, também em nível de alto detalhamento, e as benfeitorias urbanas, que são os quarteirões que compõem as áreas atingidas pelas enchentes, e todos os demais equipamentos de grande porte que possam ser representados, mas que não tornem o trabalho inviável ou demasiadamente detalhista. As pontes, que se encontram implantadas no rio Doce, em Governador Valadares, são representadas em ambos os cenários. A nomenclatura dos cenários é descrita como:

- Unidimensional Detalhado (P – UD) – Representação da topografia e batimetria.
- Unidimensional Detalhado com Áreas Bloqueadas (P – UD – AB) – Representação da topografia e batimetria considerando os quarteirões funcionando como áreas bloqueadas.

Este segundo modelo foi obtido pelo uso de um recurso que existe no software HEC-RAS 4.0, onde áreas que não possuem condutância, e não armazenam água, são representadas como áreas bloqueadas, presentes no arquivo de informações geométricas.

Na construção dos modelos topológicos desenvolvidos para representar as cheias ocorridas na cidade de Governador Valadares, uma característica consiste em não levar em consideração a condução no conjunto do sistema viário perpendicular ao rio Doce, ou seja, a representação das ruas considera somente o sentido paralelo à vazão do rio Doce, que funcionam como canais. Assim as ruas perpendiculares à vazão do rio não foram representadas. Mas, é essencial que o traçado viário seja incluído com precisão pelo MDT no modelo, pois estas agem como drenos para as enchentes na superfície, segundo Mark *et al.* (2004). Esta é, evidentemente, uma aproximação razoável e uma limitação da hipótese de simulação unidimensional aqui utilizada.

As Figuras 5 e 6 são representações em perspectiva da geometria unidimensional dos modelos P – UD e P – UD – AB.

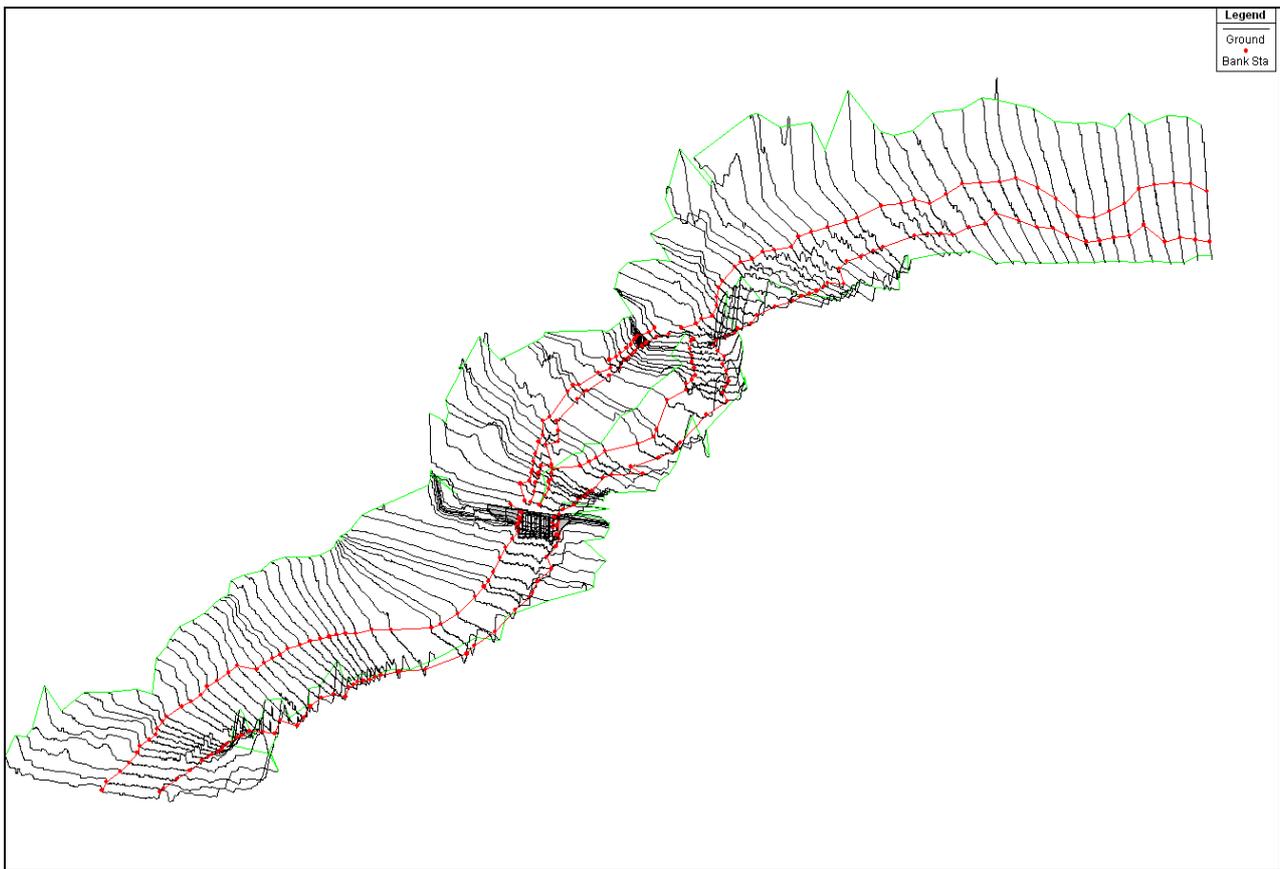


Figura 5 – Modelo Unidimensional Detalhado (P – UD).

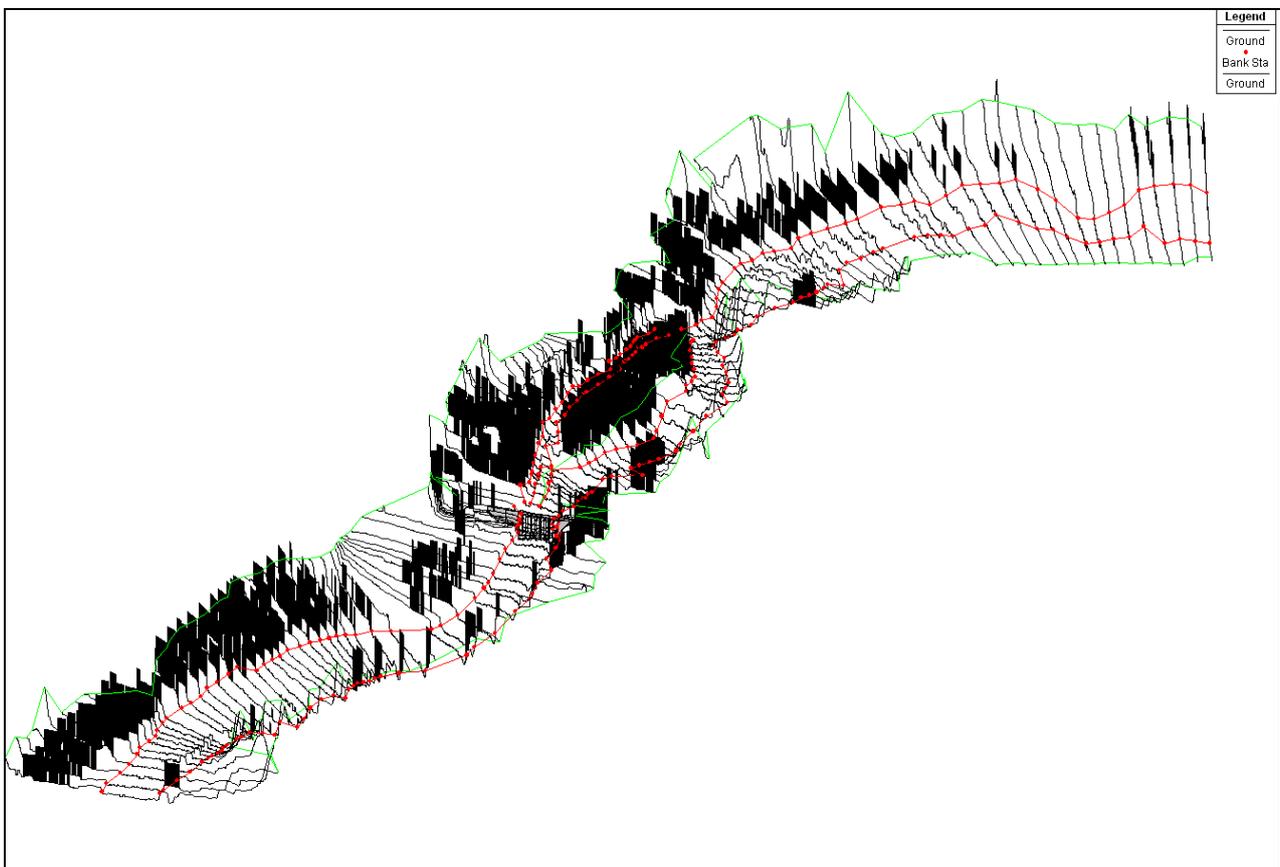


Figura 6 – Modelo Unidimensional Detalhado Áreas Bloqueadas (P – UD – AB).

As condições de contorno utilizadas são as profundidades críticas à montante, e profundidades normais à jusante, as quais são aproximadas pela declividade das seções a jusante.

Para calibração e validação do modelo hidráulico foram utilizados dados de quatro vazões monitoradas em seis seções transversais do rio Doce, registradas no período de 1998 a 2000 e marcas da cheias notáveis, como a de janeiro de 1997. As seções de monitoramento, com régua linimétrica, se localizam no bairro Santa Rita, Estação 56850000 (operada pela CPRM), SAAE, ponte da Ilha dos Araújos, bairro São Tarcísio e Univale.

A partir de um conjunto inicial de valores de rugosidade procedeu-se ao estudo da distribuição de vazões nos ramos circundantes da Ilha dos Araújos, com base nas simulações de eventos de cheias registrados, procurando aproximar as linhas de energia em ambos os ramos, com um limite de aceitação de 3 cm.

Através da adequada calibração do modelo foi realizada a identificação de coeficientes de rugosidade realistas para os diferentes usos do solo urbano. A composição dos valores dos coeficientes de Manning, especificamente para o cenário urbano em questão, teve como base a seguinte metodologia:

(i) Foram identificadas áreas homogêneas quanto à rugosidade, procurando-se atribuir valores básicos aos coeficientes de Manning, como os citados em Baptista e Coelho (2005).

(ii) Foram somados os valores dos coeficientes de Manning das superfícies que compõem determinada parte da área urbana, como, por exemplo; a superfície do revestimento, acrescido da rugosidade correspondente a lotes vagos com vegetação, do pavimento das ruas, das paredes em alvenaria, muros de pedra aparente, outras benfeitorias e equipamentos próprios de meios urbanos, que causam grande perturbação ao escoamento.

(iii) A seguir, foi acrescida ainda, ao coeficiente de Manning, a representação da presença de outros fatores, os mais diversos e variados componentes do cenário urbano, tais como; lixo, material desagregado eventualmente encontrado, carros, árvores, placas, postes, calçadas, estruturas de contenção, etc.

A calibração dos parâmetros para a modelagem hidráulica permitiu a melhor avaliação e a proposição de valores mais adequados ao cenário urbano.

A calibração executada presume o crescimento do parâmetro do coeficiente de Manning, da calha principal do rio em direção as margens ocupadas pelas benfeitorias urbanas, onde os valores dos parâmetros variam de forma crescente. Assim, procurou-se retratar adequadamente esta variação a partir da calha central do rio, com valores característicos de materiais que compunham o leito do rio, como bancos de areia, vegetação existente, etc.. Entre a calha principal do rio e a ocupação urbana existe uma pequena extensão de mata que apresenta outros valores para sua

caracterização. E, por último, encontra-se a área de ocupação urbana, que possui uma série de fatores para composição, já citados anteriormente, que tornam os valores de coeficientes de Manning significativamente maiores.

Como parte integrante do estágio de construção de um modelo hidráulico a etapa de calibração é uma fase bastante detalhada, sobretudo por tratar-se de um quadro peculiar e complexo.

Finalizadas as simulações no software HEC-RAS 4.0 procedeu-se ao mapeamento das planícies de inundação. Este mapeamento é realizado através da exportação de várias camadas, a partir do software computacional hidráulico, com diversas representações e informações, que possibilitaram o delineamento das manchas de inundação no ambiente do software SIG, ArcGIS 9.2, para as vazões utilizadas para a calibração e validação.

## **4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 – CALIBRAÇÃO DE VAZÕES**

A calibração de vazões para ambos os ramos do rio Doce, que delimitam a Ilha dos Araújos, foi procedida pelo equilíbrio da linha de energia na junção que representa a ramificação da calha principal do rio Doce em ramos esquerdo e direito. Este método de calibração indireta de vazões, com equilíbrio de energia na junção, segue a sistemática proposta pelo USACE *Application Guide* (2008).

Foi procedida a calibração para um total de oito vazões, sendo que somente quatro serão posteriormente analisadas nos tópicos seguintes.

Durante o processo de calibração de vazões pode-se perceber que quando as vazões adquirem maior magnitude ocorre um direcionamento maior para o ramo esquerdo, Figuras 7 e 8, representadas pelos pontos azuis, em porcentagem de vazão. Conseqüentemente as vazões direcionadas ao ramo direito diminuem na mesma proporção, como ilustrado pelos pontos verdes de porcentagem de vazão.

Presumivelmente esta distribuição de vazões associa-se aos maiores valores dos coeficientes de Manning para a planície de inundação do ramo direito do rio Doce, alterando a relação de condutância de acordo com as cotas atingidas pelo NA.

Este fato ocorreu durante a calibração dos modelos P – UD e P – UD – AB, como se constata pelas Figuras 7 e 8 e Tabelas 1 e 2, respectivamente.

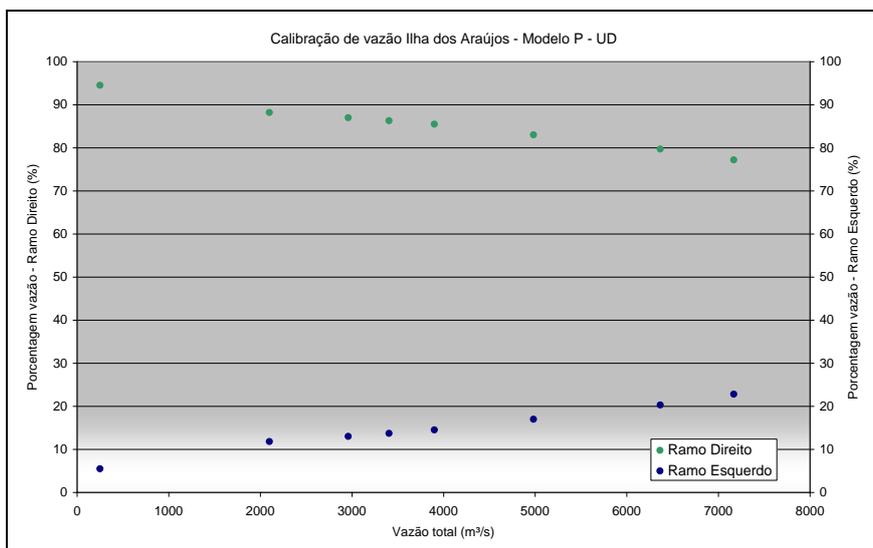


Figura 7 – Calibração de vazões para os ramos esquerdo e direito – Modelo P – UD.

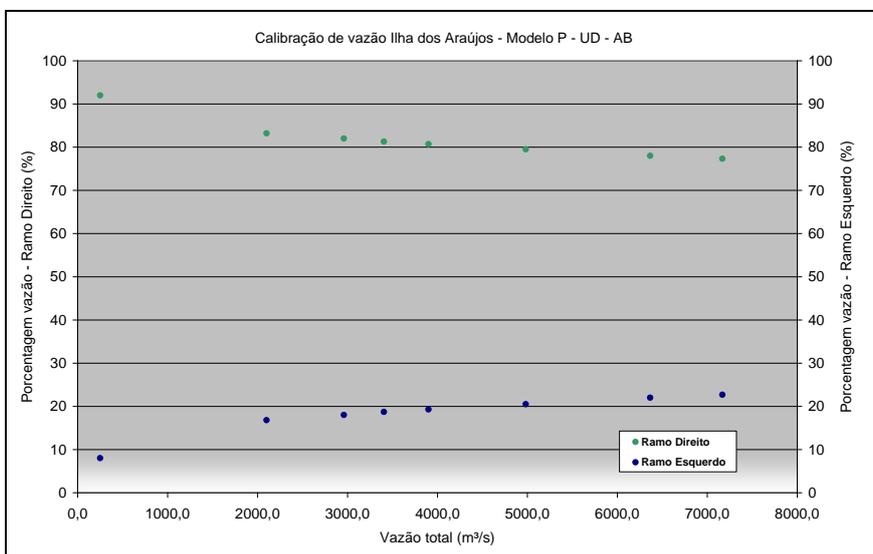


Figura 8 – Calibração de vazões para os ramos esquerdo e direito – Modelo P – UD – AB.

Tabela 1 – Valores de vazões para calibração – Modelo P – UD.

P – UD								
Canal	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8
Montante	2100,0	2960,0	3405,0	3900,0	4982,0	6366,0	7168,0	250,0
Esquerdo	247,8	384,8	466,5	565,5	846,9	1292,3	1634,3	13,8
Direito	1852,2	2575,2	2938,5	3334,5	4135,1	5073,7	5533,7	236,3
Jusante	2100,0	2960,0	3405,0	3900,0	4982,0	6366,0	7168,0	250,0

Tabela 2 – Valores de vazões para calibração – Modelo P – UD – AB.

P – UD – AB								
Canal	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8
Montante	2100,0	2960,0	3405,0	3900,0	4982,0	6366,0	7168,0	250,0
Esquerdo	352,8	532,8	636,7	752,7	1021,3	1400,5	1627,1	20,0
Direito	1747,2	2427,2	2768,3	3147,3	3960,7	4965,5	5540,9	230,0
Jusante	2100,0	2960,0	3405,0	3900,0	4982,0	6366,0	7168,0	250,0

## 4.2 – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS COEFICIENTES DE MANNING

Para a calibração e validação do modelo hidráulico utilizou-se dados de monitoramento em seis seções transversais do período de 1998 a 2000, e marcas de cheia, como as de janeiro de 1997, levantadas nas mesmas seções CPRM (2004). Com a finalização das simulações dos cenários elaborados se procedeu a uma análise dos resultados, a partir da comparação com dados observados de eventos e com a comparação entre os modelos propostos, viabilizando a análise comparativa.

Os valores dos coeficientes de Manning encontrados são similares aos encontrados em CPRM, (2004), e próximos aos de de Jong *et al.* (2003), que apresentam o valor de 0,050 para pavimentos e outras áreas urbanas. Estes autores tratam especificamente de cheias em meios urbanos.

Os valores obtidos seguem nas Tabelas 3 e 4, respectivamente para os modelos P – UD e P – UD – AB, onde os trechos estão nomeados de montante para jusante.

Tabela 3 – Coeficientes de Manning utilizados na calibração – Modelo P – UD.

P – UD				
Trecho	Meio Urbano (n)	Calha (n)	Margem Esquerda (n)	Ilhas (n)
Ilhas Montante	0,038	0,040	0,031	0,055
Ponte BR 116	0,068	0,095	0,048	0,060
Ilha Araújo - Trecho Esquerdo	0,070	0,051	0,055	0,055
Ilha Araújo - Trecho Direito	0,070	0,019	0,055	0,055
Jusante Ilha Araújo - Corredeiras	0,055	0,041	0,055	0,055
Ilhas Univale	0,055	0,051	0,055	0,055

Tabela 4 – Coeficientes de Manning utilizados na calibração – Modelo P – UD – AB.

P – UD – AB				
Trecho	Meio Urbano (n)	Calha (n)	Margem Esquerda (n)	Ilhas (n)
Ilhas Montante	0,038	0,035	0,031	0,055
Ponte BR 116	0,068	0,095	0,048	0,060
Ilha Araújo - Trecho Esquerdo	0,070	0,048	0,055	0,055
Ilha Araújo - Trecho Direito	0,070	0,018	0,055	0,055
Jusante Ilha Araújo - Corredeiras	0,055	0,041	0,055	0,055
Ilhas Univale	0,055	0,051	0,055	0,055

O valor de coeficiente de Manning encontrado para a ponte da BR–116, 0,095, deve ser visto com prudência. Ressalta-se que este valor pode não ser o mais representativo, pois se trata de uma área onde se encontra uma singularidade hidráulica, ponte e seus pilares, e os fenômenos hidráulicos associados podem interferir na calibração de coeficiente de Manning para se alcançar as cheias registradas.

As Tabelas 5, 6, 9 e 10, demonstram os resultados da calibração, e as Tabelas 7, 8, 11 e 12, demonstram os resultados da validação do coeficiente de Manning, para os modelos P – UD e P – UD – AB.

Tabela 5 – Vazões e dados utilizados para calibração do coeficiente de Manning.

P – UD – Calibração				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (m)	Elevação Calculada (m)	$\Delta$ (m)
2100	13388,89	157,83	157,82	0,010
2100	9243,461	155,62	155,7	-0,080
247,8	6758,677	154,65	154,32	0,330
1852,2	6338,117	153,97	154,1	-0,130
2100	5826,905	152,35	152,45	-0,100
2100	2125,342	149,47	149,5	-0,030

Tabela 6 – Vazões e dados utilizados para calibração do coeficiente de Manning.

P – UD – Calibração				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	$\Delta$ (mm)
4982	13388,89	159,68	159,91	-0,230
4982	9243,461	157,48	157,69	-0,210
846,9	6758,677	-	156,58	-
4135,1	6338,117	-	156,19	-
4982	5826,905	-	154,3	-
4982	2125,342	-	151,39	-

Tabela 7 – Vazões e dados utilizados para validação do coeficiente de Manning.

P – UD – Validação				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	$\Delta$ (mm)
6366	13388,89	160,48	160,63	-0,150
6366	9243,461	158,28	158,3	-0,020
1292,3	6758,677	157,51	157,45	0,060
5073,7	6338,117	156,77	156,98	-0,210
6366	5826,905	154,92	154,92	0,000
6366	2125,342	152,14	152,07	0,070

Tabela 8 – Vazões e dados utilizados para validação do coeficiente de Manning.

P – UD – Validação				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	$\Delta$ (mm)
7168	13388,89	160,88	161	-0,120
7168	9243,461	158,67	158,59	0,080
1634,3	6758,677		158	-
5533,7	6338,117		157,55	-
7168	5826,905		155,25	-
7168	2125,342	152,57	152,42	0,150

Tabela 9 – Vazões e dados utilizados para calibração do coeficiente de Manning.

P – UD – AB – Calibração				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	$\Delta$ (mm)
2100	13388,89	157,83	157,7	0,130
2100	9243,461	155,62	155,7	-0,080
352,8	6758,677	154,65	154,63	0,020
1747,2	6338,117	153,97	154,09	-0,120
2100	5826,905	152,35	152,46	-0,110
2100	2125,342	149,47	149,5	-0,030

Tabela 10 – Vazões e dados utilizados para calibração do coeficiente de Manning.

P – UD – AB – Calibração				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	Δ (mm)
4982	13388,89	159,68	159,83	-0,150
4982	9243,461	157,48	157,7	-0,220
1021,3	6758,677	–	156,85	–
3960,7	6338,117	–	156,17	–
4982	5826,905	–	154,33	–
4982	2125,342	–	151,39	–

Tabela 11 – Vazões e dados utilizados para validação do coeficiente de Manning.

P – UD – AB – Validação				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	Δ (mm)
6366	13388,89	160,48	160,59	-0,110
6366	9243,461	158,28	158,33	-0,050
1400,5	6758,677	157,51	157,72	-0,210
4965,5	6338,117	156,77	157,06	-0,290
6366	5826,905	154,92	154,97	-0,050
6366	2125,342	152,14	152,06	0,080

Tabela 12 – Vazões e dados utilizados para validação do coeficiente de Manning.

P – UD – AB – Validação				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Seção Modelo	Elevação Observada (mm)	Elevação Calculada (mm)	Δ (mm)
7168	13388,89	160,88	160,98	-0,100
7168	9243,461	158,67	158,65	0,020
1627,1	6758,677	–	158,26	–
5540,9	6338,117	–	157,69	–
7168	5826,905	–	155,31	–
7168	2125,342	152,57	152,42	0,150

Os perfis longitudinais para os modelos P – UD e P – UD – AB são a seguir apresentados, respectivamente, nas Figuras 9 e 10.

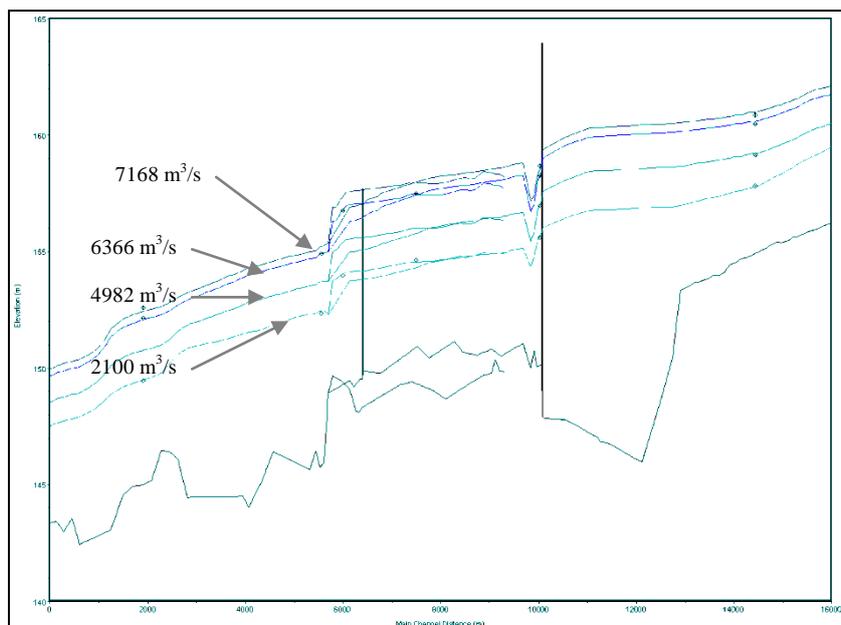


Figura 9 – Perfil longitudinal com vazões de calibração e validação – Modelo P – UD.

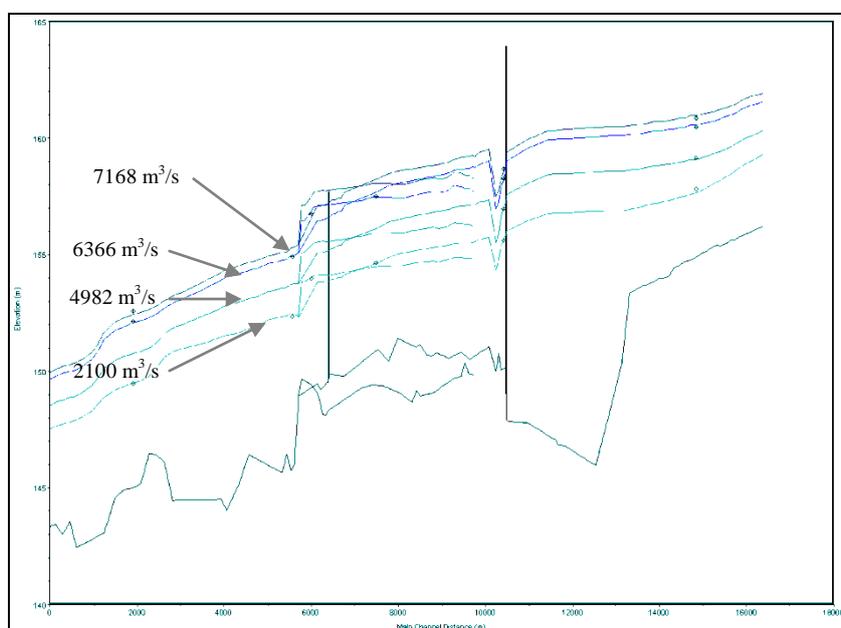


Figura 10 – Perfil longitudinal com vazões de calibração e validação – Modelo P – UD – AB.

### 4.3 – MANCHAS DE INUNDAÇÃO

As Figuras 11 a 14 e 15 a 18 apresentam as manchas de inundação para os modelos P – UD e P – UD – AB, respectivamente, para as vazões de calibração de 2100 e 4982 m<sup>3</sup>/s, e para as cheias de 6366 e 7168 m<sup>3</sup>/s, utilizadas para validação.

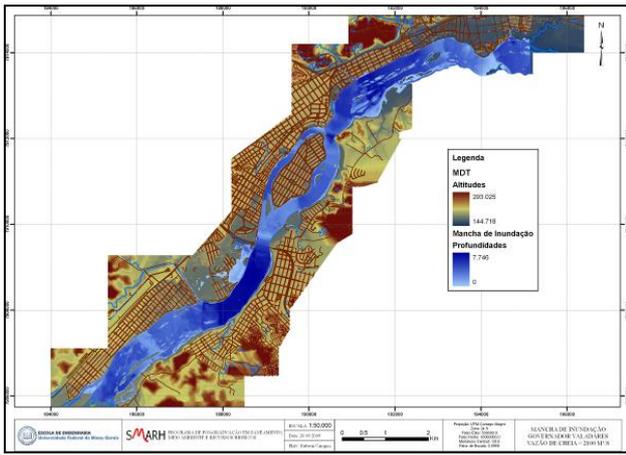


Figura 11 – Mancha de inundação para a vazão de calibração de 2100 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD.

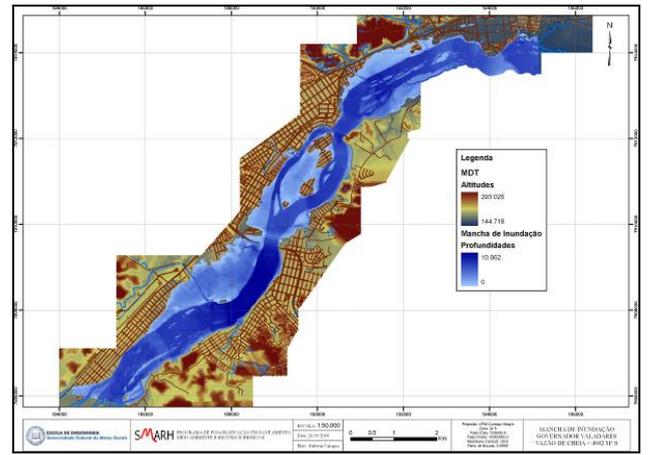


Figura 12 – Mancha de inundação para a vazão de calibração de 4982 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD.

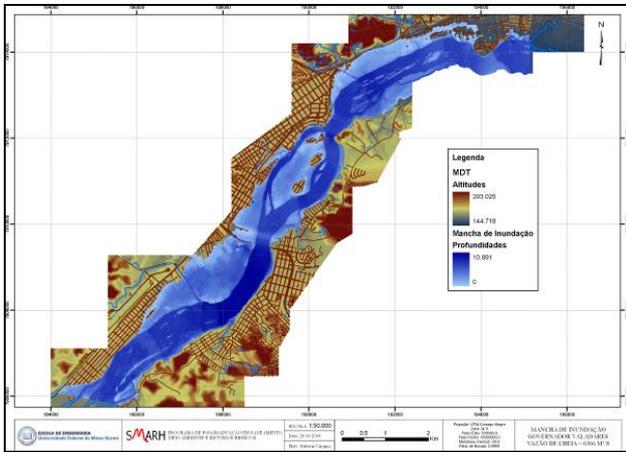


Figura 13 – Mancha de inundação para a vazão de validação de 6366 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD.

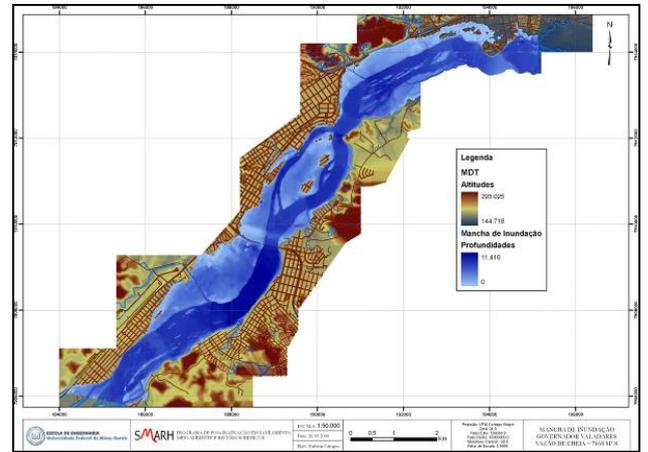


Figura 14 – Mancha de inundação para a vazão de validação de 7168 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD.

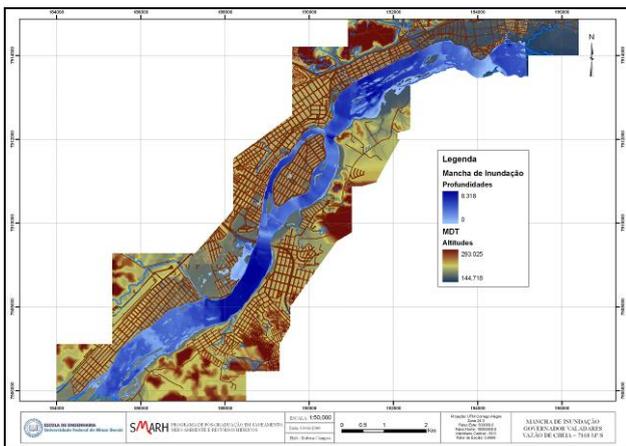


Figura 15 – Mancha de inundação para a vazão de calibração de 2100 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD – AB.

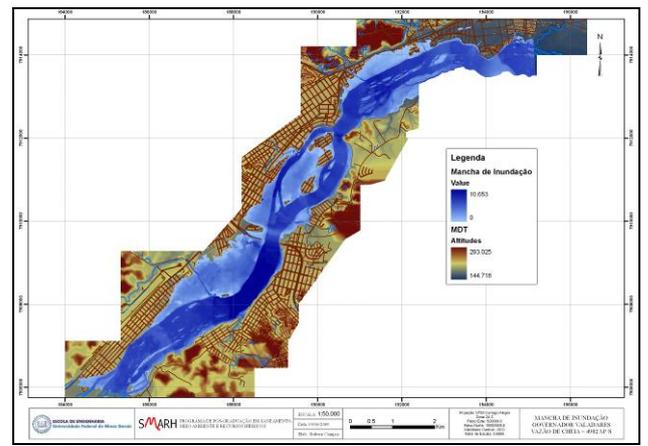


Figura 16 – Mancha de inundação para a vazão de calibração de 4982 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD – AB.

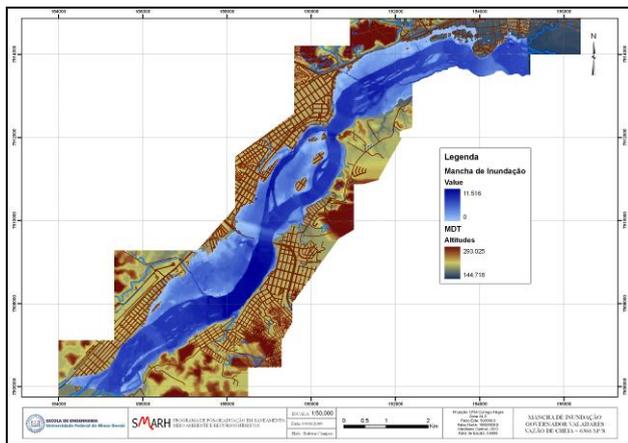


Figura 17 – Mancha de inundação para a vazão de validação de 6366 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD – AB.

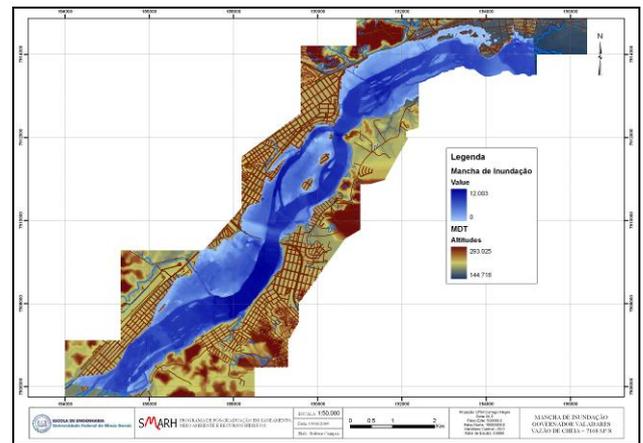


Figura 18 – Mancha de inundação para a vazão de validação de 7168 m<sup>3</sup>/s (Escala Distorcida) – Modelo P – UD – AB.

## 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os modelos se mostraram robustos e apresentam uma margem de pequenas variações para representações de grandes vazões.

Os valores de coeficientes de Manning encontrados durante a calibração e validação são consistentes com os encontrados em outras pesquisas para representação de cheias em meios urbanos e sugere-se a sua utilização para estes fins.

Percebe-se que, de uma forma geral, os valores de coeficientes de Manning são menores para o modelo P – UD – AB. Isto se deve ao uso das áreas bloqueadas, as quais apresentam uma maior área de interferência com o escoamento, com maior perímetro molhado, menor área para condutância, e, conseqüentemente, menores valores do coeficiente de Manning são necessários para calibrar e validar o modelo. Assim, acredita-se que a modelagem mais adequada, para os cenários urbanos, deve contar com esta representação.

As manchas de inundação obtidas são representativas e apresentam boa aderência aos pontos observados das cheias, não havendo diferença significativa que se destaque entre estas. Contudo, a representação por áreas bloqueadas sugere um melhor detalhamento dos equipamentos urbanos.

A utilização desta modelagem pode ser útil para o sistema de alerta proposto para Governador Valadares.

A tarefa de obtenção e geração da geometria dos dados consumiu um tempo elevado no desenvolvimento da pesquisa. Fica evidente que dados de topografia devem ser submetidos a uma rigorosa análise de consistência antes de sua utilização.

Notoriamente, dados de topografia e batimetria são caros e demandam tempo para serem obtidos. O maior erro que pode estar associado a este tipo de modelagem, provavelmente, é oriundo

desta fonte. Assim, para um melhor aproveitamento destes dados deve-se procurar sempre trabalhar com o mesmo marco topográfico para conciliação dos levantamentos topográfico e batimétrico.

Uma vez que esta geometria está definida sua aplicação nos mais variados softwares e modelos é uma tarefa menos complexa, bastando uma simples conversão de formatos, para utilização em softwares hidrodinâmicos bidimensionais, possibilitando comparações analíticas futuras.

## 6 – BIBLIOGRAFIA

Baptista, M; Coelho, M.M.L.P. Fundamentos de Engenharia Hidráulica: ABRH, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

Castilho, A.S.; Pinto, É.J.A.; Oliveira G.S.R. Utilização de modelo hidráulico associado a um SIG para a definição de áreas inundáveis na cidade de Governador Valadares, Minas Gerais. 20 p. 2004.

CPRM. Sistema de alerta contra enchentes da Bacia do rio Doce – Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta – Dezembro de 2003 a Março de 2004. 128 p. Belo Horizonte.

<http://www.GoogleEarth.com>. Acesso 15 de Maio de 2009.

de Jong, S.M., Van der Sande, C.J., de Roo, A.P.J. *A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment*. 2003. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 4, p 217–229.

Mascarenhas, F.; D'álterio, C.; Campos, R.; Miguez, M. Cenários de cheias urbanas simulados por modelo matemático – Projeto da bacia do canal do Mangue. 2000. 20 p. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e Fundação Rio – Águas, Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro.

Mascarenhas, F.C.B.; Miguez, M.G. Modelação matemática de cheias urbanas através de um esquema de células de escoamento. 1999. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v.4, n.1, pp. 119–140, janeiro a março.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Arronnet, S. B., Djordjevic, S. *Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding*. Journal of Hydrology, p 284–299. 2004.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers (2008) HEC–RAS River Analysis System – *Application Guide. Version 4.0*: 351 p.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers (2008) HEC–RAS River Analysis System – *User's Manual. Version 4.0*: 733 p.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers (2005) HEC–GeoRAS – *GIS tools for support of HEC–RAS Using ArcGIS – User's Manual. Version 4.1.1*: 204 p.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Alice Castilho e Éber Pinto, pela ajuda na interpretação das informações, ao Francisco Eustáquio pelas boas idéias, ao João Alves Filho no apoio do SIG e aos colegas da Golder.