

# SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO À MODELAGEM HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

**Celso Bandeira de Melo Ribeiro**

Engenheiro Civil, Doutor em Recursos Hídricos pelo DEA/UFV, Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFJF, Faculdade de Engenharia, Bairro Martelos, Plataforma 4, Campus Universitário - CEP: 36036-900 - Juiz de Fora - MG. E-mail: [celso.bandeira@ufff.edu.br](mailto:celso.bandeira@ufff.edu.br)

**Ricardo Neves de Souza Lima**

Geógrafo, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ecologia - PGECOL/UFJF - ICB-UFJF, Bairro Martelos, Campus Universitário - CEP: 36036-900 - Juiz de Fora - MG. E-mail: [ricneves80@yahoo.com.br](mailto:ricneves80@yahoo.com.br)

## Resumo

Inundações em áreas urbanas geralmente provocam danos ambientais, materiais e econômicos. A previsão de inundações urbanas representa uma ferramenta importante aos gestores públicos para o planejamento ambiental e territorial. Entretanto estudos dessa natureza ainda são escassos, porém de extrema importância. Considerando a ocorrência de inundações na bacia hidrográfica do córrego Humaitá esta área foi selecionada para a modelagem hidrológica e hidráulica com objetivo de identificar as áreas de maior risco. Foram utilizados o pacote computacional HEC-RAS e técnicas de geoprocessamento no SIG ArcGIS®. Os resultados mostraram que as áreas potencialmente mais afetadas por inundações são áreas de pastagens e de mata, porém foram obtidas manchas de inundação em áreas densamente urbanizadas nesta bacia, o que representa um risco a segurança da população e das estruturas urbanas existentes.

**Palavras-chave:** Modelagem Hidrológica, áreas de risco, inundações urbanas.

## Abstract

Floods in urban areas are frequent occurrences and often cause environmental, materials and economic damage. The prediction of urban floods represents an important tool for policy makers to environmental and territorial planning. However such studies are still scarce, but extremely important. Considering the occurrence of floods in the Humaitá watershed, this area was selected for the hydrologic and hydraulic modeling to identify greatest risk areas. We used the computer package HEC-RAS and GIS techniques in ArcGIS®. The results showed that most potentially affected areas by flooding are pasture and forest, but we obtained flooding patches in densely urbanized areas in this watershed, which represents a security risk to the population and the existing urban structures.

**Keywords:** Hydrologic modeling, risk areas, urban flooding.

## Introdução

A inundação urbana é uma ocorrência tão antiga quanto as cidades ou qualquer aglomerado urbano. A inundação ocorre quando as águas dos

diferentes cursos d'água saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte destes sistemas e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e

passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros (TUCCI, 2007).

Estes eventos podem ocorrer devido ao regime natural dos rios ou ampliado pelo efeito de alterações produzidas pelo homem na superfície do solo de uma bacia hidrográfica, principalmente pelo processo de urbanização, que provoca a impermeabilização das superfícies e canalização dos rios.

De acordo com Tucci e Bertoni (2003) o crescimento urbano desordenado configura-se como um dos principais fatores associados à ocorrência de inundações. Este processo ocorre devido à falta de controle do espaço urbano produzindo efeito sobre a infra-estrutura de água: abastecimento, esgotamento sanitário, drenagem urbana e resíduos sólidos.

A cidade de Juiz de Fora/MG apresenta desde o início de sua urbanização uma forte tendência a impermeabilização do solo e a ocupação desordenada nas margens de cursos d'água. Este processo tem causado sérios prejuízos materiais às comunidades que vivem nestas áreas e danos às estruturas urbanas do município especialmente durante eventos de precipitações intensas típicas do verão no sudeste brasileiro.

O vale do rio Paraibuna, que corta o município de Juiz de Fora no sentido noroeste-sudeste, apresenta na porção norte do município planícies aluvionares extensas com declividades mais amenas que contribuem para a redução da velocidade do fluxo dos rios (PJF, 2004). Este fator se agrava pela presença de superfícies impermeabilizadas que impedem a infiltração eficiente da água das chuvas e favorecem o escoamento superficial.

O resultado deste quadro é a formação de inundações urbanas frequentes que anualmente causam transtornos e prejuízos à população e aos cofres públicos durante as chuvas de verão. A previsão e o mapeamento dos locais de maior susceptibilidade a ocorrência destes eventos torna-se de fundamental importância para o zoneamento urbano e para a locação de obras de drenagem que visem minimizar os efeitos negativos das inundações para a sociedade.

Por isso, considera-se de extrema importância para o planejamento urbano a aplicação de modelos hidráulicos computacionais que permitam a modelagem e a simulação destes eventos através da sistematização dos processos hidráulicos que ocorrem em canais de drenagem naturais ou artificiais e a análise de sua interação com as planícies adjacentes.

Segundo Gontijo (2007) a distribuição temporal e espacial das precipitações são as principais condições climatológicas, que associadas às características

físicas e de cobertura do solo de bacias hidrográficas determinam as vazões que fluem nos cursos d'água.

A previsão de cheia a longo prazo quantifica as chances de ocorrência da inundação em termos estatísticos, sem precisar quando ocorrerá a cheia. A previsão a longo prazo se baseia na estatística de ocorrência de níveis no passado e permite estabelecer os níveis de enchente para alguns riscos escolhidos.

Neste sentido, visando auxiliar o processo de planejamento urbano no município de Juiz de Fora, procurou-se desenvolver neste trabalho simulações hidráulicas e hidrológicas para períodos de retorno de 5, 50 e 100 anos, visando identificar as áreas de risco de inundação a partir de eventos extremos de chuva, utilizando como área piloto a sub-bacia do córrego Humaitá, tributário do rio Paraibuna, que apresenta um histórico de frequentes inundações no período chuvoso.

## **Material e Métodos**

### **Caracterização da Área de Estudo**

O município de Juiz de Fora se localiza na mesorregião da Zona da Mata de Minas Gerais entre as coordenadas 21° 31' e 21° 59' de latitude sul e 43° 08' e 44° 41' de longitude oeste, e está contido no trecho médio da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, pertencente à bacia do rio Paraíba do Sul. O Perímetro Urbano do município de Juiz de Fora é drenado por 156 sub-bacias de diversas dimensões. Este município se encontra no domínio dos mares de morros florestados (AB' SABER, 2003), que é caracterizado por apresentar um relevo movimentado com vertentes convexas ou côncavo-convexas e planícies meândricas, que eram recobertos, de modo predominante, por vegetação de floresta de Mata Atlântica.

O regime climático da região segundo a classificação de W. Koeppen é o mesotérmico (Cwa) com verões quentes e estação chuvosa também no verão. A precipitação média anual é de cerca de 1500 mm, com os maiores índices mensais no mês de janeiro, com cerca de 298 mm, enquanto que a média térmica anual oscila em torno de 18,9°C. O mês mais quente (fevereiro) possui média próxima a 21,7°C e o mês mais frio (julho), 16,1°C.

A área piloto para realização do presente trabalho consistiu na bacia hidrográfica do córrego Humaitá (BHCH) localizada na área urbana do município (figura 1). Cabe ressaltar que este trabalho compreende uma parte dos estudos de desenvolvimento do Plano de Drenagem do Município de Juiz de Fora.

Os principais bairros drenados pela bacia do córrego Humaitá são os bairros Milho Branco, Francisco Bernardino, Jardim Natal e Industrial, caracterizados pelo alto adensamento populacional, onde predominam residências unifamiliares de baixa e média renda. Estes

bairros estão localizados próximos aos dois principais córregos que drenam a bacia, onde historicamente são frequentes os episódios de enchentes durante as chuvas de verão.

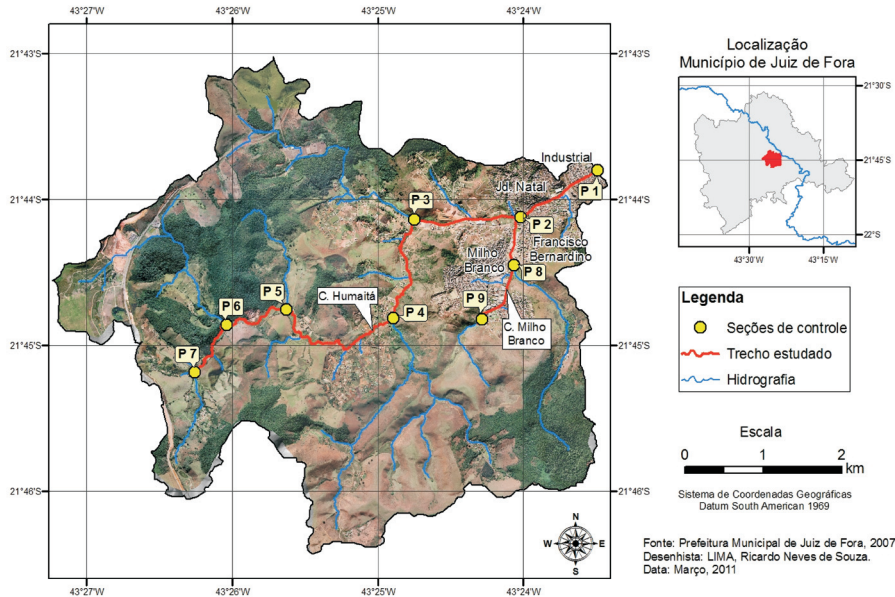


Figura 1 - Localização da área de estudo.

## Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada para possibilitar a estimativa da vazão máxima em determinados pontos dos córregos Humaitá e Milho Branco considerando os períodos de retorno de 5, 50 e 100 anos.

Foram selecionados 9 seções de controle, sendo 7 no córrego Humaitá e 2 no córrego Milho Branco (Figura 1), localizados na confluência com outros córregos da bacia.

Para cada seção foi obtida sua respectiva área de contribuição, utilizando-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 1m, disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Juiz de Fora (PJF). Para isso, no SIG ArcGIS®, foi elaborado o Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC), através do método “stream burning” (HUTCHINSON, 1989) que permitiu definir as direções do escoamento superficial sobre o terreno.

A partir do modelo de direção de escoamento foram geradas automaticamente as áreas de contribuição para cada seção e calculadas suas respectivas áreas.

Para a obtenção das vazões máximas em cada seção de controle foi utilizado o Método Racional Modificado (CARVALHO, 2008), através da equação (1):

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \cdot \varphi \quad (1)$$

Onde:

- Q = Vazão máxima de escoamento superficial, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>;
- C = Coeficiente de escoamento superficial, adimensional;
- i = Intensidade média máxima de precipitação, mm h<sup>-1</sup>;
- A = Área da bacia de drenagem, ha;
- φ = Coeficiente de retardamento (0,278 – 0,0000034\*A);

O valor de “C” foi obtido através da ponderação do tipo de cobertura e uso e solo, declividade do terreno e tempo de retorno de acordo com a tabela a seguir (Tabela 1)

**Tabela 1 – Valores do coeficiente de escoamento superficial (C)**

TIPOS DE SUPERFÍCIE	TEMPO DE RETORNO (ANOS)		
	5	50	100
<b>ASFALTO / ÁREAS URBANAS</b>	0,77	0,9	0,95
<b>PASTOS</b>			
Plana, 0 - 2%	0,28	0,37	0,53
Média, 2 - 7%	0,36	0,45	0,49
Inclinada, > 7%	0,4	0,49	0,53
<b>FLORESTA / REFLORESTAMENTO</b>			
Plana, 0 - 2%	0,25	0,35	0,39
Média, 2 - 7%	0,34	0,43	0,47
Inclinada, > 7%	0,39	0,48	0,52

Fonte: Genovez, 2001.

As classes de uso e cobertura do solo foram mapeadas a partir do satélite Landsat TM/5 órbita/ponto 217/75 de 26/08/2010, adquiridas do banco de imagens do INPE, e consistiram nas seguintes classes: **Mata** (Vegetação arbóreo-arbustiva); **Água** (Massas d'água em geral); **Área urbana** (Residências, arruamento, áreas construídas, etc); **Pastagem** (Áreas de vegetação rasteira, áreas abandonadas) e **Solo exposto** (Áreas erodidas, solo nú).

As classes de declividade foram obtidas no SIG ArcGIS® a partir do MDE, sendo definidas as seguintes classes: de 0 a 2%; 2 a 7% e acima de 7%.

O valor de “i” foi obtido utilizando a relação intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial através da equação (2):

$$i = \frac{k \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (2)$$

Onde:

i = Intensidade média máxima de precipitação, mm h<sup>-1</sup>;  
 T = Período de retorno, anos;  
 t = Tempo de duração da chuva, min;  
 k, a, b, c = Coeficientes de ajustamento específicos para cada localidade.

Os valores de “T” considerados foram 5, 50 e 100 anos. Os coeficientes de ajustamento “k”, “a”, “b” e “c” foram obtidos pelo software Plúvio (GPRH/UFV) para a cidade de Juiz de Fora.

O tempo de duração da chuva (t) foi obtido a partir do tempo de concentração (T<sub>c</sub>) para diferentes seções de controle na bacia, a partir da equação de *Ven Te Chow* (CARVALHO, 2008):

$$t = T_c = 5,77 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,64} \quad (3)$$

Onde:

t = Tempo de duração da chuva, min;  
 T<sub>c</sub> = Tempo de concentração, min;  
 L = Comprimento do talvegue, km;  
 S = Declividade média do talvegue, m m<sup>-1</sup>

O valor de “S” foi obtido pela diferença entre a máxima elevação do curso d'água e sua elevação na seção de controle dividido pela distância horizontal do trecho. O comprimento do talvegue (L) foi obtido medindo-se a distância horizontal da drenagem desde a nascente até as seções de controle.

### Simulação das manchas de inundação

Para a simulação de inundações na área de estudo foi utilizado o modelo de simulação hidráulica HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA (*US Army Corps of Engineers*), e que consiste em software *stand alone* que permite o cálculo hidráulico do escoamento em canais naturais e artificiais (USACE, 2009 e USACE, 2010). A execução desta etapa foi realizada através de três procedimentos básicos, a saber:

- 1) Geração da base de dados de entrada;
- 2) Execução do modelo hidráulico HEC-RAS, e
- 3) Pós-processamento e visualização dos resultados.

A geração da base de dados foi realizado através do SIG ArcGIS, enquanto a execução do modelo e a visualização dos resultados foi realizada pelo software HEC-RAS.

As vazões máximas obtidas na modelagem hidrológica, assim como os elementos hidráulicos (rede de drenagem, seções transversais e limites da calha) foram inseridas como parâmetros de entrada no modelo HEC-RAS. Os dados de saída do modelo foram os níveis da água em cada seção, os quais foram sobrepostos ao MDE para estimar a extensão das manchas de inundação assim como suas profundidades.

## Resultados e Discussão

### Área de contribuição das seções de controle

O MDEHC gerado para a bacia do córrego Humaitá possibilitou modelar o escoamento superficial acumulado sobre o terreno e quantificar a área de contribuição para cada pixel da rede de drenagem. Dessa forma foi possível a obtenção da área de contribuição das seções de controle, como observado a seguir (tabela 2).

**Tabela 2 – Área de contribuição das seções de controle**

Seção de controle	Curso d'água	Área de drenagem	
		km <sup>2</sup>	ha
P 1 (*)	Humaitá	24,39	2439,4
P 2	Humaitá	23,47	2347,1
P 3	Humaitá	17,85	1785,4
P 4	Humaitá	13,06	1306,3
P 5	Humaitá	6,51	651,7
P 6	Humaitá	4,79	479,6
P 7	Humaitá	1,27	127,2
P 8	Milho Branco	3,89	389,0
P 9	Milho Branco	0,85	85,6

(\*) Correspondente a área total da bacia do córrego Humaitá.

### Coefficiente de escoamento superficial da bacia do córrego Humaitá

A partir do mapa de uso e cobertura do solo da bacia do córrego Humaitá (Figura 2) pôde ser identificada a predominância de áreas ocupadas por pastagens (62,03%), seguido por áreas de mata (25,63%), áreas urbanizadas (11,78%), solo exposto (0,51%) e corpos hídricos (0,03%).

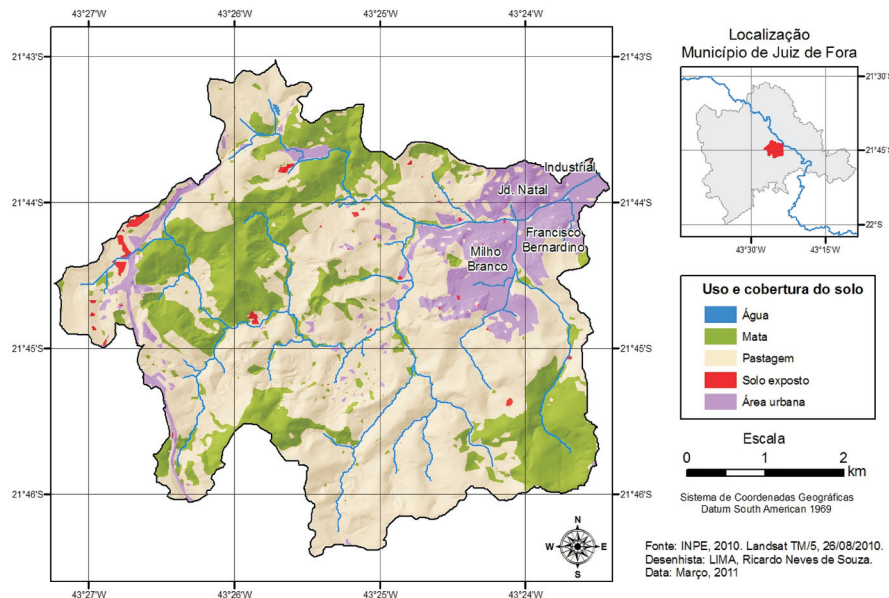


Figura 2 – Classes de Uso e Cobertura do solo.

As classes de declividade que interferem significativamente no padrão de escoamento superficial na bacia do córrego Humaitá podem ser observadas na figura 3. As áreas mais planas (0 a 2%) ocupam 3% da

área total da bacia, enquanto as áreas intermediárias (2 a 7%) ocupam 8,6% e as áreas com relevo mais acidentado (> 7%) ocupam a maior parte da área da bacia, 88,3%.

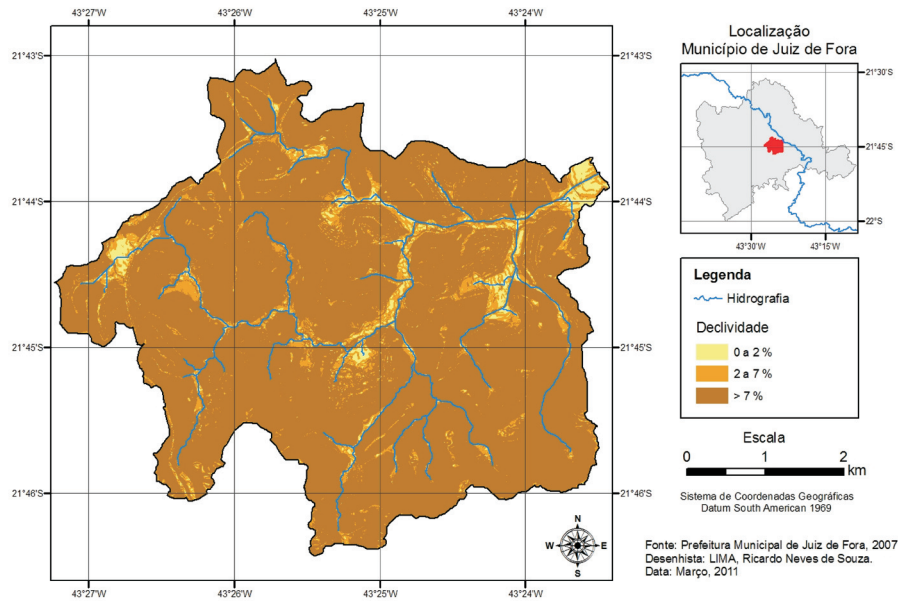


Figura 3 – Classes de Declividade consideradas.

Para a área total da bacia do córrego Humaitá, assim como para área de contribuição das seções de controle foram obtidos o coeficiente de escoamento médio para cada tempo de retorno (TR), conforme mostrado na tabela 3. Estes valores foram obtidos pela ponderação do valor de C de cada tipo de uso do solo e classe de declividade pela área de contribuição de cada seção.

**Tabela 3 – Coeficiente de escoamento (C) médio para a área de contribuição de cada seção de controle.**

Seção de Controle (Área de contribuição)	C -médio		
	Tempo de retorno		
	5	50	100
P 1	0,438	0,533	0,576
P 2	0,429	0,523	0,566
P 3	0,407	0,499	0,541
P 4	0,406	0,498	0,540
P 5	0,410	0,503	0,545
P 6	0,417	0,509	0,553
P 7	0,421	0,514	0,555
P 8	0,469	0,567	0,610
P 9	0,399	0,489	0,529

Na tabela 4 podem ser observados os valores obtidos de intensidade média máxima da precipitação (i) na área de drenagem de cada seção de controle e as vazões máximas (Q-máx) para os três períodos de retorno.

**Tabela 4 – Intensidade média máxima de precipitação (i) e vazões máximas de escoamento superficial (Q-máx) para cada seção de controle, considerando três períodos de retorno (TR).**

Seção de Controle	TR = 5		TR = 50		TR = 100	
	i (mm. H)	Q- máx (m³/s)	i (mm. H)	Q- máx (m³/s)	i (mm. H)	Q- máx (m³/s)
P 1	20,09	16,08	29,92	29,14	33,73	35,51
P 2	19,87	15,01	29,60	27,25	33,37	33,25
P 3	23,82	13,08	35,48	23,88	40,00	29,18
P 4	32,12	12,94	47,84	23,65	53,93	28,91
P 5	46,95	9,61	69,93	17,56	78,84	21,45
P 6	82,48	12,66	122,84	23,02	138,49	28,20
P 7	111,55	4,61	166,15	8,37	187,31	10,19
P 8	62,81	8,81	93,54	15,86	105,46	19,23
P 9	113,65	3,00	169,26	5,47	190,82	6,67

### Manchas de inundação na bacia do córrego Humaitá

Os dados obtidos através da simulação hidráulica no software HEC-RAS, utilizando as vazões máximas

calculadas, foram processados sobre o MDE, o que permitiu visualizar a extensão das áreas inundáveis (figura 4).

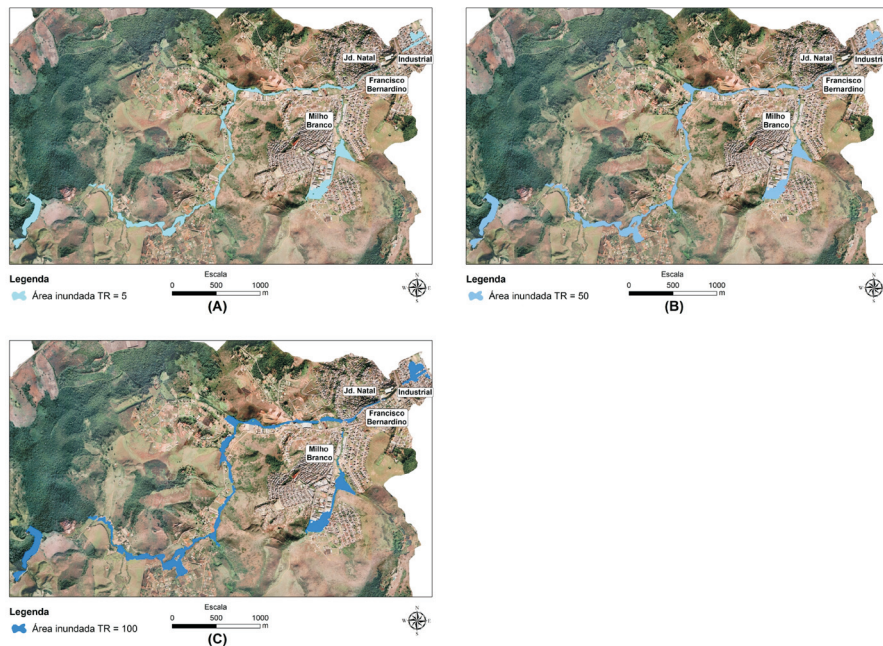


Figura 4 – Manchas de inundação na bacia do córrego Humaitá: (A) Tempo de retorno (TR) de 5 anos; (B) TR de 50 anos, e (C) TR de 100 anos.

A partir da simulação das áreas inundáveis foram identificados os tipos de uso e cobertura do solo com risco a inundações para os três períodos de retorno (tabela 5).

**Tabela 5 – Proporção das áreas de risco a inundações com relação ao tipo de uso e cobertura do solo.**

Classe de uso e cobertura do solo	Área inundada - ha			Proporção da área inundada		
	TR = 5	TR = 50	TR = 100	TR = 5	TR = 50	TR = 100
Mata	7,53	8,26	8,50	29,89%	27,17%	26,40%
Pastagem	12,32	15,36	16,28	48,91%	50,52%	50,55%
Solo exposto	0,03	0,04	0,04	0,13%	0,12%	0,12%
Área urbana	5,31	6,74	7,38	21,07%	22,18%	22,92%
<b>Total</b>	<b>25,19</b>	<b>30,40</b>	<b>32,21</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Pode-se observar na tabela 5 que a maior parte das áreas de risco a inundações na bacia do córrego Humaitá correspondem a áreas cobertas por pastagem. Por ser o tipo predominante de cobertura do solo, apresenta naturalmente maiores riscos de inundações, principalmente quando próximo aos cursos d'água, o que favorece tam-

bém a ocorrência de processos erosivos em suas margens.

As áreas de mata também apresentaram considerável susceptibilidade a inundações, principalmente matas secundárias (capoeiras) e vegetações herbáceas próximos aos cursos d'água. Estas áreas localizam-se em geral em trechos pouco urbanizados da bacia, que apresentam o predomínio de sítios e granjeamentos, onde o risco social e econômico das enchentes é considerado menor.

Apesar das áreas urbanas serem relativamente menos atingidas pelas manchas de inundações simuladas na área de estudo, estas são as mais vulneráveis devido aos aspectos sociais e econômicos envolvidos. Dessa forma alguns locais foram considerados críticos a ocorrência de inundações pela presença de residências e estruturas urbanas. Nas figuras a seguir (Figuras 5, 6 e 7) são mostrados alguns trechos críticos onde estão representadas as profundidades relativas das manchas de inundações simuladas para o período de retorno de 100 anos.

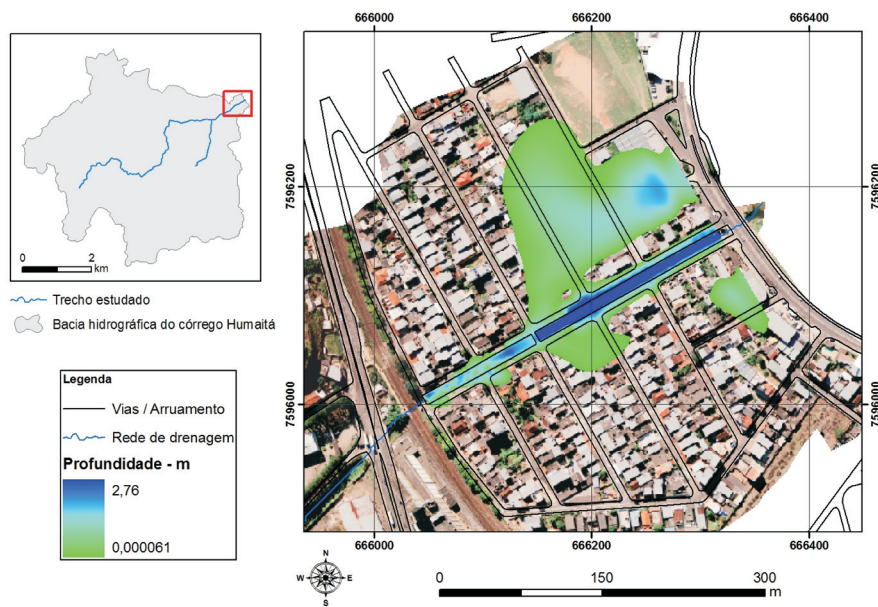


Figura 5 – Manchas de inundação em área densamente urbanizada no bairro Industrial. (TR=100 anos)

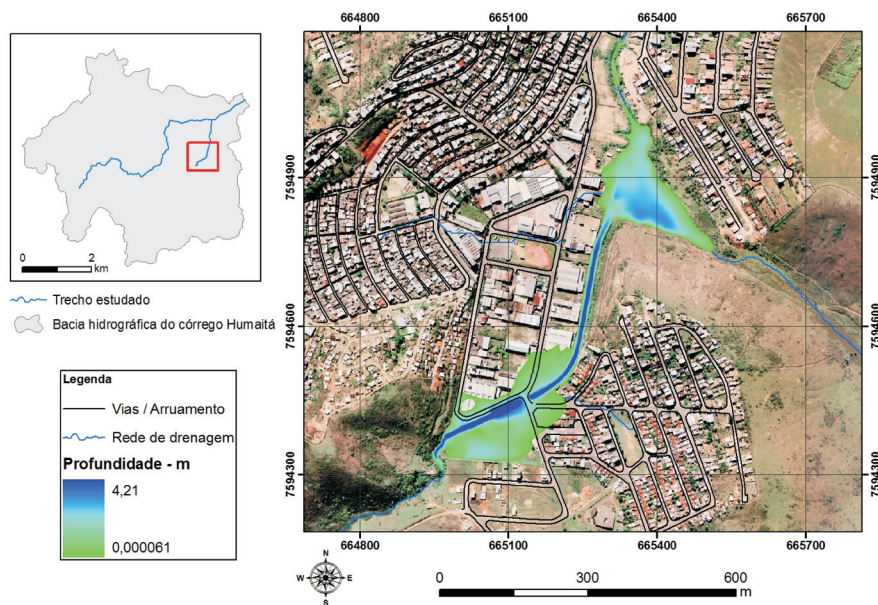


Figura 6 – Manchas de inundação em área urbanizada no bairro Milho Branco. (TR=100 anos)



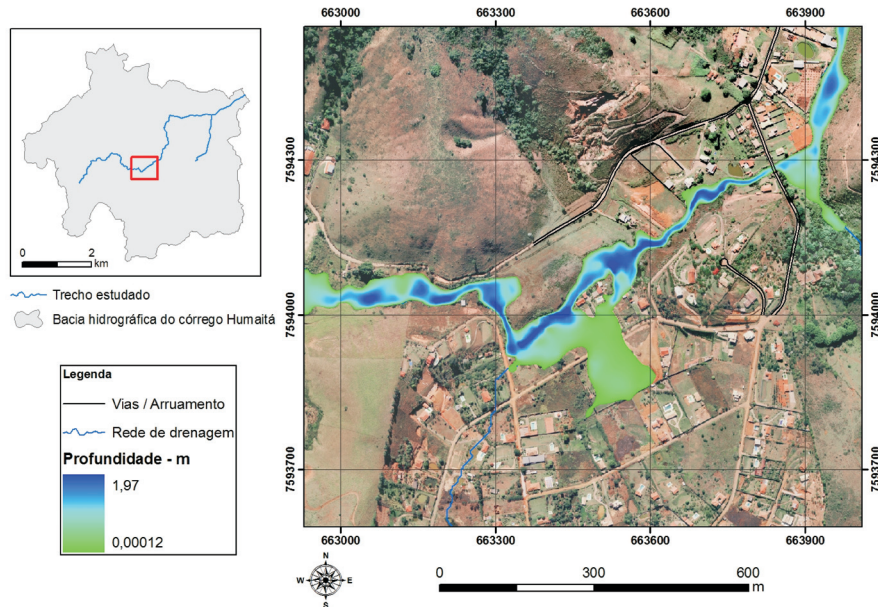


Figura 7 – Manchas de inundação em área esparsamente urbanizada. (TR=100 anos)

## Conclusão

A partir do estudo hidrológico apoiado por técnicas de geoprocessamento foi possível estimar as vazões máximas nas seções de controle nos córregos Humaitá e Milho Branco em diferentes períodos de retorno. Estes dados permitiram desenvolver uma simulação da ocorrência de manchas de inundação sob diferentes probabilidades através da modelagem hidráulica dos canais de drenagem.

As informações obtidas revelam a vulnerabilidade à ocorrência de inundações em determinados locais da área de estudo, especialmente em áreas densamente urbanizadas, o que representa um sério risco a segurança da população e das construções nestes locais.

Os resultados demonstraram o grande potencial da integração de técnicas de simulação hidrológica, hidráulica e de geoprocessamento no auxílio ao planejamento territorial e gerenciamento de recursos hídricos, visando à tomada de decisão dos gestores municipais.

## Referências Bibliográficas

- AB' SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 2ª ed. Ateliê Editorial: São Paulo, 2003, 160 p.
- CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de Pequenas Barragens para Irrigação**. Editora UFLA: Lavras – MG, 2008, 158 p.

GENOVEZ, A. M. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. ABRH, Ed. UFRGS: Porto Alegre – RS, 2001, 625 p.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

HUTCHINSON, M.F. **A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits**. *Journal of Hydrology*, v.106, 1989, p. 211-232.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA - P.J.F. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Juiz de Fora**. FUNALFA Edições: Juiz de Fora – MG, 2004, 580 p.

TUCCI, C. E. M. e BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. ABRH, Ed. UFRGS: Porto Alegre – RS, 2003, 471 p.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. ABRH/RHAMA: Porto Alegre - RS, 2007, 393 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS: User's Manual, version 4.2**. Hydrologic Engineering Center, 2009, 246 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System: User's Manual, version 4.1**. Hydrologic Engineering Center, 2010, 790 p.