

**ANÁLISE AUTOMATIZADA DE INUNDAÇÕES URBANAS SIMULADAS  
POR MODELAGEM BIDIMENSIONAL**

*Marcela Rafaela de Freitas Silva<sup>1</sup>; Larissa Santana Serra<sup>2</sup> & Adriano Rolim da Paz<sup>3</sup>*

**RESUMO** – Este artigo mostra a aplicação de uma ferramenta computacional de pós-processamento de resultados gerados por um modelo 2D de inundação. Essa ferramenta serve para auxiliar a análise dos resultados obtidos por modelos hidrológicos, evitando o esforço manual e repetitivo, que não soma conhecimento para o modelador. O algoritmo é escrito na linguagem de programação Fortran e têm como dados de entrada séries temporais compostas por arquivos de profundidade e delimitação da bacia; gera como saída uma série de variáveis em mapas e em arquivo ASCII, que podem ser divididas em duas categorias de análises, que serão discutidas nesse estudo: integrada no espaço e no tempo. É apresentado como estudo de caso a análise das simulações da bacia Arroio Moinho da Areia, em Porto Alegre. Foram feitas simulações com o modelo bidimensional para chuvas com tempo de retorno de 10 e 100 anos. Os resultados obtidos evidenciam a utilidade da rotina proposta como promotora da análise dos padrões espaço-temporais de inundação simulados, permitindo analisar variáveis diferentes das obtidas via softwares comuns de geoprocessamento. Tal forma de análise poderia ser implementada para caracterizar e localizar a inundação em tempo real, incorporada a um sistema de previsão e alerta de inundações urbanas.

**ABSTRACT**- This article shows the application of a computational tool of post-processing results generated by a 2D flooding model. This tool intent to assist the analysis of the results obtained by hydrological models, avoiding the manual and repetitive effort, which does not add knowledge to the modeler. The algorithm is written with Fotran programming language and has as input temporal series composed by depth and bay delimitation files; it generates as output a series of variables in maps and in ASCII files that can be divided into two categories of analysis, which will be discussed in this study: integrated in space and time. It is presented as a case study the analysis of the simulations of the urban catchment Arroio Moinho da Areia, in Porto Alegre. Simulations were made with the two-dimensional model for rains with a return time of 10 and 100 years. The obtained results evidenced the utility of the proposed routine as a promoter of analysis of spatial and temporal patterns of flooding simulations, allowing analyzing the different variables obtained with common GIS softwares. This kind of analysis could be implemented to typify and locate the flood in real-time, attached to a forecast and urban flood alert system.

**Palavras-Chave** – Modelagem Hidrológica, Análise espaço-temporal.

---

1) Estudante de graduação em Engenharia Ambiental – Depto de Eng. Civil e Ambiental - CT - UFPB. Campus I, João Pessoa -PB, 58051-900. (83) 32167355. Email marcela.rafaela@gmail.com

2) Estudante de graduação em Engenharia Ambiental – Depto de Eng. Civil e Ambiental - CT - UFPB. Campus I, João Pessoa -PB, 58051-900. (83) 32167355. Email larissas.serra23@gmail.com

3) Professor Adjunto do Depto de Eng. Civil e Ambiental - CT - UFPB. Campus I, João Pessoa-PB, 58051-900. (83) 3216 7355. Email adrianorpaz@yahoo.com.br

## INTRODUÇÃO

O início do uso de modelos matemáticos para simular o escoamento da água remonta ao século XIX, com equações derivadas da mecânica dos fluidos (Cunge et al., 1981). Diversas formulações têm sido propostas conforme os objetivos do estudo, a disponibilidade de dados, as características da região, a disponibilidade de recursos computacionais e humanos (Fread, 1992).

Os avanços na capacidade de processamento e armazenamento de computadores pessoais, o desenvolvimento e familiarização com técnicas de geoprocessamento e sistemas de informação geográfica e a crescente disponibilização de dados tem servido para impulsionar ainda mais o uso da ferramenta modelagem hidrológica. Um dos motivos é que todos esses fatores contribuem para a maior facilidade para preparação dos dados de entrada para os modelos hidrológicos, reduzindo o tempo e esforço necessários para a simulação de diferentes cenários. Nesse sentido, diversas ferramentas computacionais tem sido desenvolvidas para automatizar a preparação de dados de entrada para modelos hidrológicos (Olivera et al., 2006; Hellweger e Maidment, 1999; Merkel et al., 2008; Maidment, 2002; Paz e Collischonn, 2007).

Quanto maior a velocidade de simulação de cenários diversos, maior a quantidade de resultados a analisar, o que também demanda consideráveis quantidades de tempo e esforço. Por isso, também são desenvolvidas ferramentas para auxiliar a análise dos resultados obtidos por modelos hidrológicos, principalmente quando se trata de analisar resultados variáveis espaço-temporalmente. Um exemplo é a ferramenta HEC-GeoRAS, desenvolvida na forma de uma extensão do software ArcGIS especificamente para processar dados de entrada e resultados do modelo HEC-RAS (Ackerman et al., 2005).

O desenvolvimento de ferramentas computacionais para automatizar o pré- ou pós-processamento de dados e resultados de um modelo hidrológico tem como vantagem principal reduzir o tempo gasto com tarefas que demandariam grande esforço manual e repetitivo, sem agregar conhecimento ao estudo do problema em análise. Outro benefício importante do uso de tais ferramentas é possibilitar a exploração de padrões espaço-temporais de variáveis de interesse de uma forma e com uma velocidade dificilmente alcançáveis com a realização de análises manuais.

No caso de estudos de inundações urbanas, uma abordagem utilizada é a simulação bidimensional (2D) das inundações sobre a superfície, oriundas do extravasamento de volumes de água do sistema de galerias da micro e macrodrenagem. Para cada rodada do modelo, são gerados como resultados dezenas ou centenas de mapas de profundidade de inundação ao longo do tempo. Este artigo apresenta o desenvolvimento e aplicação de uma ferramenta de pós-processamento de séries temporais de inundação simulados por um modelo matemático 2D. São extraídas diversas variáveis que procuram retratar o padrão espaço-temporal de inundação e também produzir

informações de utilidade para fins de planejamento de intervenções e eventualmente sistemas de alerta e previsão de eventos extremos. É tomada como estudo de caso a bacia urbana do Arroio Moinho da Areia, em Porto Alegre (RS), por já ter sido simulada anteriormente com modelo 2D (Paz et al. 2011; Paz et al. 2012).

## MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES

O modelo de inundação 2D é uma adaptação do módulo 2D do sistema de simulação para modelagem hidrológica de áreas urbanas chamado SIRIPLAN (Paz et al., 2011). O SIRIPLAN foi originalmente desenvolvido para simular sistemas complexos de grandes rios e planícies de inundação (Paz et al. 2011), e o modelo 2D que o compõe segue a abordagem primeiramente proposta por Bates e De Roo.

O Modelo de Inundação 2D usa uma abordagem onda cinemática para simular o fluxo entre elementos vizinhos ortogonais dentro de uma grade quadrada. Esse fluxo é calculado de acordo com as diferenças de elevação e profundidade entre os elementos, usando uma versão adaptada da equação de Manning (Bates e De Roo, 2000).

$${}^tQ_x^{i,j} = \pm \frac{{}^t h_{\text{flow}}^{5/3}}{n} \left( \frac{|{}^t h^{i,j} - {}^t h^{i+1,j}|}{\Delta x} \right)^{1/2} \cdot \Delta y \quad (1)$$

Onde  $Q_x$  é a descarga e  $x$  é a direção entre os elementos,  $h$  é a profundidade da água,  $h_{\text{flow}}$  é a profundidade da água disponível para o fluxo entre dois elementos no tempo  $t$ , que é dada como a diferença entre a profundidade máxima entre eles e a máxima elevação do terreno; e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning;  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são as dimensões dos elementos na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente.

A entrada de água no modelo 2D ocorre apenas através de elementos da grade localizados acima de bueiros ou outras estruturas hidráulicas, através do extravasamento da água da rede de condutos 1D. Na versão do modelo 2D utilizado nessa pesquisa, não há fluxo do modelo 2D para o 1D. A cada passo de tempo, o balanço hídrico em um determinado elemento é usado para atualizar seu nível de água, por meio de um esquema numérico explícito no tempo e progressivo no espaço.

$${}^{t+\Delta t} h^{i,j} = {}^t h^{i,j} + \frac{({}^t Q_x^{j-1,j} - {}^t Q_x^{i,j} + {}^t Q_y^{i,j-1} - {}^t Q_y^{i,j} + {}^t Q_{\text{ex}}^{i,j}) \cdot \Delta t}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (2)$$

Onde  ${}^t Q_y$  é a vazão na direção  $y$  entre os elementos; e significa a vazão de troca entre o elemento 2D e o ponto de conexão correspondente (boca-de-lobo ou poço de visita) da rede de condutos 1D.

## ALGORITMO DE PÓS-PROCESSAMENTO DE RESULTADOS

O algoritmo de pós-processamento de resultados, desenvolvido para receber os arquivos de saída do modelo 2D e automatizar cálculos com esses resultados, tem seu código escrito na linguagem computacional Fortran, composto por 11 sub-rotinas de processamento. Como dados de entrada, tem-se as séries temporais de arquivos raster (dados matriciais) de profundidade da inundação e a delimitação da bacia (Figura 1), todos georeferenciados. As análises realizadas podem ser divididas em duas categorias: análise integrada no tempo e análise integrada no espaço., conforme descrição a seguir.

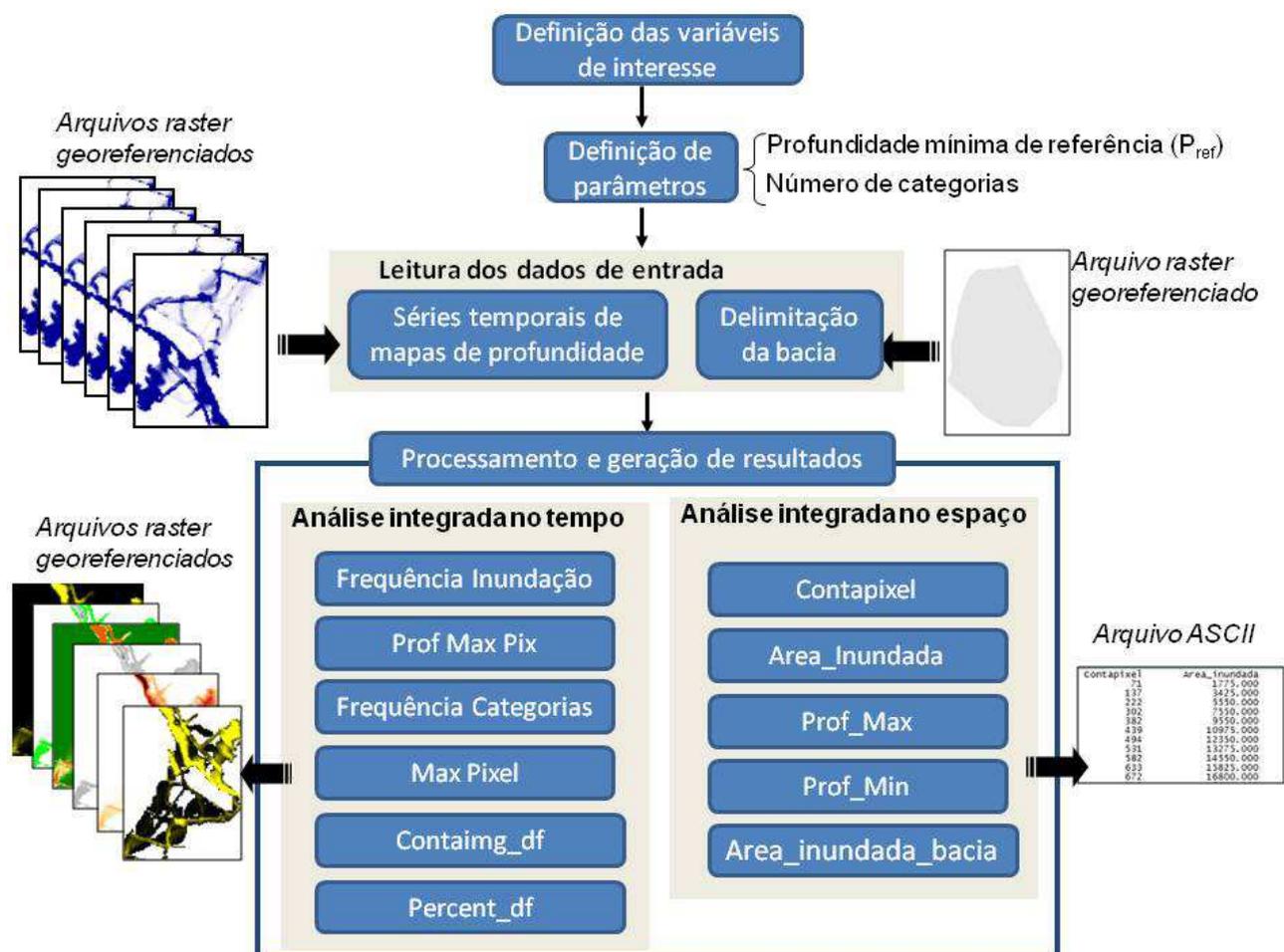


Figura 1- Fluxograma representativo do algoritmo de pós-processamento, com suas etapas e processos.

### Análise integrada no espaço

Na análise integrada no espaço, são determinadas variáveis de interesse que resumem características das inundações em cada instante de tempo. São determinadas variáveis como: número de pixels inundados (variável denominada Contapixel); área inundada (Area\_inundada); profundidade máxima (Prof\_max); profundidade mínima (Prof\_min); e área inundada internamente

à bacia (Area\_inundada\_bacia). Cada variável possui um valor de cálculo para cada arquivo de profundidade presente nos arquivos de entrada e, portanto, são produzidas séries temporais dessas variáveis. Não se tem informação espacial acerca das inundações, mas valores agregados para toda a área de estudo, daí a denominação de análise integrada no espaço.

Essas variáveis são escritas e organizadas em um arquivo em formato ASCII, no qual também consta a classificação tendo como base categorias de intervalos de profundidade e a classificação da área inundada por categoriais.

Contapixe1	Area_inundada	Prof_max	Prof_min	Area_inundada_bacia
71	1775.000	0.648	0.000	1775.000
137	3425.000	0.832	0.000	3425.000
222	5550.000	0.874	0.000	5550.000
302	7550.000	0.861	0.000	7550.000
382	9550.000	0.919	0.000	9550.000
439	10975.000	1.744	0.000	10975.000
494	12350.000	1.839	0.000	12350.000
531	13275.000	1.860	0.000	13275.000
582	14550.000	1.902	0.000	14550.000
633	15825.000	1.954	0.000	15825.000
672	16800.000	1.999	0.000	16800.000
715	17875.000	2.050	0.000	17875.000
758	18950.000	2.074	0.000	18950.000
784	19600.000	2.087	0.000	19600.000
811	20275.000	2.096	0.000	20275.000
842	21050.000	2.100	0.000	21050.000
864	21600.000	2.104	0.000	21600.000
882	22050.000	2.104	0.000	22050.000
893	22325.000	2.104	0.000	22325.000
916	22900.000	2.202	0.000	22900.000
937	23425.000	2.451	0.000	23425.000
957	23925.000	2.729	0.000	23925.000
980	24500.000	3.044	0.000	24500.000
1003	25075.000	3.501	0.000	25075.000
1048	26200.000	3.301	0.000	26200.000
1080	27000.000	3.407	0.000	27000.000
1109	27725.000	3.442	0.000	27725.000
1142	28550.000	3.458	0.000	28550.000
1170	29250.000	3.786	0.000	29250.000
1198	29950.000	3.797	0.000	29950.000
1259	31475.000	3.812	0.000	31475.000
1323	33075.000	3.845	0.000	33075.000
1371	34275.000	3.682	0.000	34275.000
1419	35475.000	3.956	0.000	35475.000
1479	36975.000	4.233	0.000	36975.000

Figura 2 - Arquivo ASCII com alguns resultados numéricos gerados pelo algoritmo.

### Análise integrada no tempo

Neste tipo de análise, o interesse é avaliar espacialmente características das inundações que ocorreram ao longo do tempo. A idéia é analisar cada pixel individualmente quanto ao seu estado de inundação ou não ao longo da série temporal de mapas de profundidade, gerados com o modelo 2D. A composição da análise individual de cada pixel forma imagem (matriz) apresentado na forma de mapa que reflete espacialmente a variação de uma característica específica das inundações ao longo do tempo.

As variáveis trabalhadas na análise integrada no tempo são:

- Frequência de Inundação (Frequência Inundação): indica a porcentagem do tempo que cada pixel permaneceu inundado durante a simulação. Tal análise permite identificar

áreas que demandam maior urgência de intervenções no sistema de drenagem urbana, por apresentarem inundações mais permanentes e, assim, de maior potencial de geração de prejuízos;

- Profundidade Máxima por Pixel (ProfMaxPix): aponta a profundidade máxima que cada pixel alcançou individualmente. Esse tipo de informação tem interesse para sistemas de previsão e alerta, por permitir a distinção entre áreas sujeitas a inundações que tendem a gerar apenas prejuízos materiais daquelas cujas profundidades de inundação podem se tornar riscos à integridade física de transeuntes;
- Instante de tempo em que cada pixel alcançou sua profundidade máxima (Max Pixel): fornece uma informação temporal da ocorrência da máxima inundação e tem grande potencial para auxiliar sistemas de previsão e alerta de inundações, por permitir dimensionar o tempo de resposta necessário para mitigar os impactos da inundação para cada setor da bacia;
- Intervalo de tempo que cada pixel permaneceu inundado além de uma profundidade pré-estabelecida (df) (Contaimg\_Df): considerando um limiar de profundidade mínima definida pelo usuário, determina para cada pixel a duração de tempo em que ele apresentou inundações acima desse valor. Essa informação combina os aspectos de riscos devido a grandes profundidades com a permanência da inundação ao longo do tempo;
- Porcentagem de tempo inundado acima de uma profundidade pré-estabelecida (Percent\_df): analogamente à variável anterior, mas expressando a permanência da inundação acima do limiar escolhido em termos percentuais.

Todas essas variáveis são produzidas na forma de arquivos raster georreferenciados. Tais informações são de grande utilidade na hora de monitorar os danos causados pelas chuvas, mitigar esses impactos, planejar e dimensionar as intervenções necessárias para minimizar os danos e prejuízos para o patrimônio público e da população, localizar espacialmente as inundações e obter as informações que se necessita.

## **ESTUDO DE CASO**

Como estudo de caso deste trabalho, foi tomada a bacia urbana do Arroio Moinho da Areia, localizada na cidade de Porto Alegre (região sul do Brasil). Essa bacia tem uma área de aproximadamente 11,7 km<sup>2</sup> e seu curso principal tem 5,4 km de comprimento (Porto Alegre, 2002).

Como a ocupação urbana nessa área é intensa, há deficiência no escoamento das águas e as inundações são bastante frequentes (Oliveira e Guasselli, 2011).

Tal bacia tem sido utilizada como área-piloto no desenvolvimento e análise do modelo 2D de inundações urbanas (Paz et al., 2011; Paz et al., 2012), tendo sido disponibilizados dados de entrada para as simulações descritas neste artigo.

No estudo de Paz et al. (2011), a bacia do Arroio Moinho da Areia foi simulada acoplando três modelos: um modelo chuva-vazão, um modelo hidrodinâmico 1D aplicado à rede de condutos do sistema de drenagem e um modelo 2D de simulação de inundações na superfície. Os hidrogramas em 10 pontos de extravasamento da rede de condutos 1D foram obtidos e considerados como entrada para o modelo 2D. Neste estudo, os resultados das inundações em termos de mapas de profundidade gerados pelo modelo 2D foram tomados para testar o algoritmo de pós-processamento proposto. Os mapas de profundidade são referentes às simulações com chuvas de projeto de tempos de recorrência de 10 e 100 anos. Os hidrogramas extravasados da rede de condutos 1D em ambas as simulações são apresentados na Figura 3.

Na aplicação do modelo 2D do estudo de Paz et al. (2011), a discretização da grade numérica do modelo 2D foi feita com pixels de 5 x 5 metros, de acordo com a resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponível. A simulação 2D foi realizada para um período de tempo de 1 h e 40 min, com um passo de tempo de cálculo de 1 s para evitar instabilidades numéricas.

A localização dos pontos de extravasamento ao longo da bacia é indicada na Figura 4, superposta ao MDE. No hidrograma para a chuva de 100 anos de recorrência, o pico de vazão acontece para o bueiro 8, com uma vazão de aproximadamente 40 m<sup>3</sup>/s, acontecendo no tempo de 40 minutos. Já para o evento de 10 anos de retorno, o valor máximo acontece para o bueiro número 5, com vazão aproximada de 10 m<sup>3</sup>/s, ocorrendo aos 32 minutos.

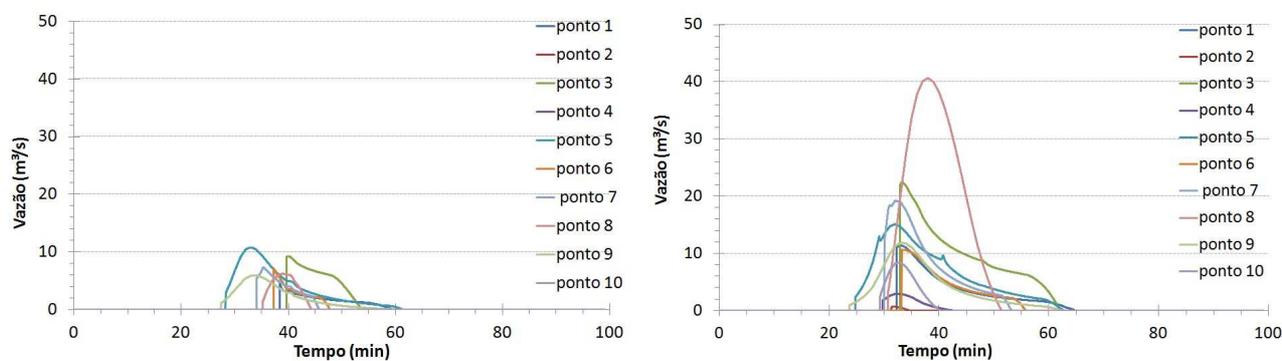


Figura 3- Hidrogramas extravasados da rede de de condutos 1D nas simulações com os eventos de 10 (gráfico à esquerda) e 100 anos de recorrência (gráfico à direita), gerados no trabalho de Paz et al. (2011) e utilizados neste estudo de caso.

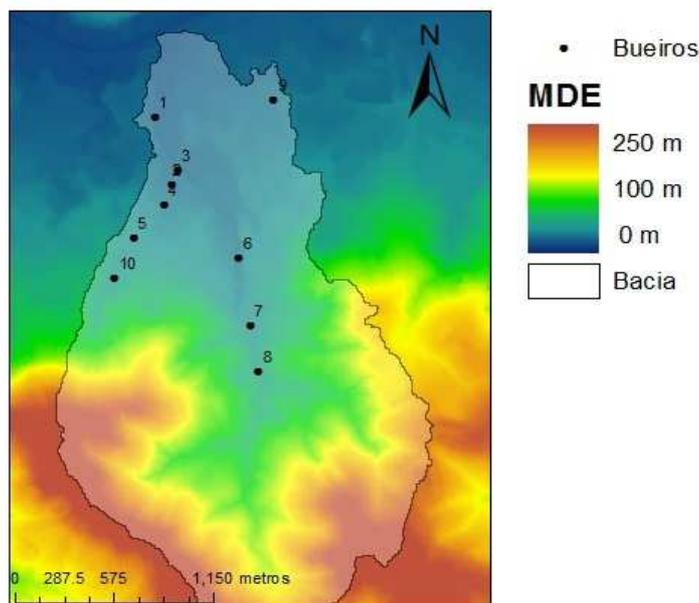


Figura 4-Modelo Digital de Elevação da bacia do Arroio Moinho da Areia.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado da simulação do modelo 2D de inundação para o estudo de caso deste trabalho, foi gerado um total de 98 mapas de profundidade do escoamento – um a cada minuto do período de simulação. Cada mapa é uma imagem raster com discretização espacial igual à adotada no modelo 2D (5 x 5 m), com coordenadas geográficas e o atributo em cada pixel é a lâmina d'água em metros. Os resultados do pós-processamento dessa série temporal de mapas de profundidade é apresentado a seguir, sub-divididos nas análises integradas no tempo e no espaço.

### Resultados da análise integrada no espaço

Quando se compara os mapas gerados pelo modelo de simulação 2D ao longo do tempo, podem ser observados resultados importantes. Como por exemplo, uma imagem que mostra a evolução da inundação ao longo do intervalo simulado, oferecendo uma visão de todo o processo. Há condições de perceber quais áreas foram mais ou menos atingidas pela chuva (observando a quantidade inundada) e quais as respectivas profundidades para esses momentos.

Na Figura 5, observa-se que a inundação dentro da bacia, para a chuva de 100 anos de recorrência, cresce consideravelmente a partir dos 30 minutos, inundando 8.400 m<sup>2</sup> e chegando ao seu ápice aproximadamente nos 50 minutos, com 142.325 m<sup>2</sup> de inundação. Também aos 50 minutos, a água começa a extrapolar os limites da bacia, acumulando 29.600 m<sup>2</sup> ao fim dos 98 minutos. Já para o evento de chuva de 10 anos de recorrência, os valores de área inundada são bem menores, além de não ocorrer extravasamento para fora da bacia. Para esse evento, aos 63 minutos a

inundação alcança seu valor máximo de 46.750 m<sup>2</sup> (cerca de 33% apenas da máxima inundação referente ao evento de 100 anos), e logo depois se mantém em valores bem próximos a 40.000 m<sup>2</sup>. Como a inundação não alcançou o exutório da bacia a curva de área inundada referente ao evento de 10 anos não tem uma mudança ou curvatura significativa, como tem o de 100 anos. A inundação cresce e se estabiliza em um valor aproximado do máximo.

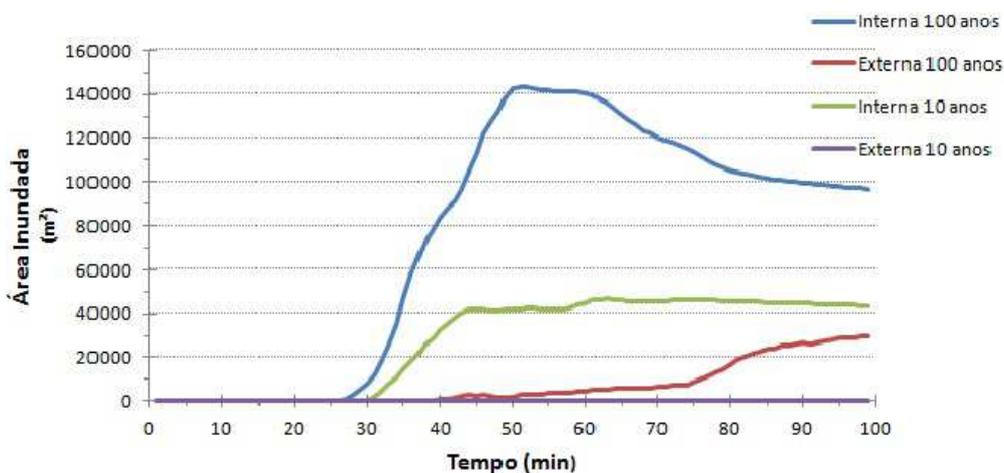


Figura 5 - Gráfico de áreas inundadas no tempo para inundações internas e externas à bacia, para chuvas de 100 e 10 anos de recorrência.

Na figura 6, que mostra as profundidades ao longo do tempo, observa-se que a profundidade máxima para chuvas de 100 anos ocorreu no instante de tempo 53 minutos, medindo cerca de 6,8 metros. Logo após essa marca, a profundidade máxima reduz e se estabiliza em seguida em pouco abaixo dos 6 metros. Já a maior marca registrada para o tempo de recorrência de 10 anos é de 5 metros, se estabilizando em torno dos 4,5 metros, sem nenhuma perda para inundações externas à bacia.

É importante observar que o gráfico de profundidade declina simultaneamente ao gráfico das áreas inundadas, logo, quando a área inundada diminui, as profundidades também. O mesmo é possível afirmar para o ponto inicial de ascendência do gráfico de inundação, que coincide com o de profundidade.

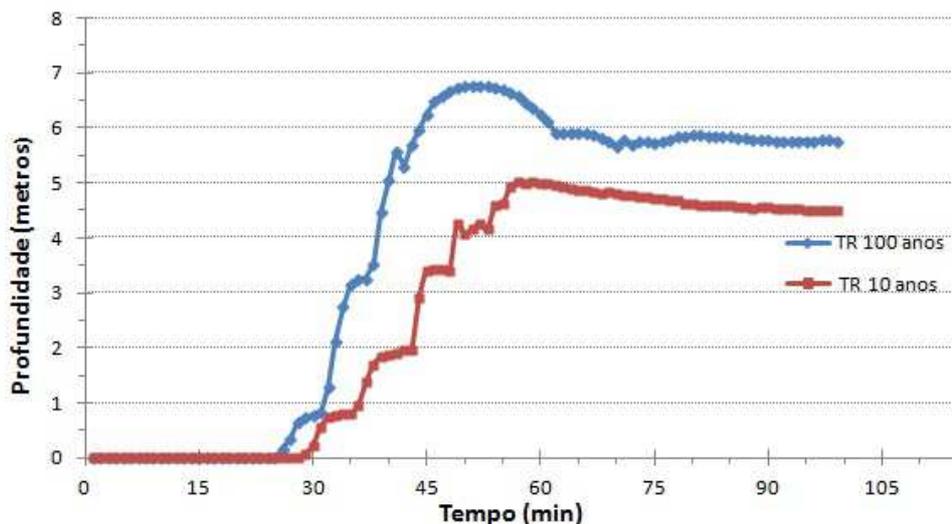


Figura 6- Profundidades ao longo do tempo para chuvas com tempos de 100 e 10 anos de recorrência (TR).

O algoritmo de pós-processamento também gera como resultado o número de pixels classificados em intervalos de profundidades delimitados por um limite à esquerda (inferior) e um limite à direita (superior). Considerando todos os pixels com uma área superficial igual a 25 m<sup>2</sup>, tem-se a área inundada para cada intervalo de profundidade (Tabela 1).

Tabela 1 – Áreas de inundação por intervalo de profundidade nas simulações com eventos de chuva de 10 e 100 anos de recorrência.

Intervalo de profundidade		Área inundada no instante de tempo 50 minutos		Área inundada no instante de tempo 90 minutos	
Limite Inferior	Limite Superior	TR 100 anos	TR 10 anos	TR 100 anos	TR 10 anos
0.1 m	1.10 m	126050 m <sup>2</sup>	37900 m <sup>2</sup>	94275 m <sup>2</sup>	39975 m <sup>2</sup>
1.10 m	2.10 m	14575 m <sup>2</sup>	3200 m <sup>2</sup>	21550 m <sup>2</sup>	3500 m <sup>2</sup>
2.10 m	3.10 m	3075 m <sup>2</sup>	725 m <sup>2</sup>	5775 m <sup>2</sup>	750 m <sup>2</sup>
3.10 m	4.10 m	1150 m <sup>2</sup>	275 m <sup>2</sup>	1950 m <sup>2</sup>	200 m <sup>2</sup>
4.10 m	5.10 m	225 m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	475 m <sup>2</sup>	50 m <sup>2</sup>
5.10 m	6.10 m	300 m <sup>2</sup>	0	659 m <sup>2</sup>	0
6.10 m	7.10 m	50 m <sup>2</sup>	0	0	0

Observando as tabelas, confirma-se o que já havia mostrado o gráfico de áreas inundadas, já que o maior volume inundado encontra na tabela correspondente ao minuto 50, coincidindo com o pico do gráfico. E é justamente aos 50 minutos que se encontra a profundidade máxima, entre o intervalo 6,10 e 7,10 metros. A partir daí, as profundidades não passam do valor aproximado de 6 metros.

Tanto para eventos de 100 anos de recorrência, quanto para os de 10 anos, a lâmina de inundação com maior área superficial ocorre no intervalo de profundidade que vai de 0,1 metros a

1,10 metros. No minuto 50, a lâmina d'água possui uma superfície de inundação que corresponde a aproximadamente 87% do total, nessa faixa, nos eventos de 100 anos de recorrência; para os de 10 a porcentagem é um valor aproximado a 90%. Aos 90 minutos, a faixa de profundidade até 1,10 metros para chuvas de 100 anos de tempo de recorrência corresponde a 75, 6% da inundação total nesse minuto; já para 10 anos, corresponde a 90%.

### **Resultados da análise integrada no tempo**

Os mapas possuem a capacidade de mostrar a situação de cada pixel de acordo com o parâmetro escolhido, mas de forma conjunta para todos os pixels, daí a importância de analisar os resultados por meio deles. No mapa de porcentagem de inundação da Figura 7, correspondente à chuva com tempo de recorrência de 100 anos, a predominância é de áreas com inundação em torno de 20 a 40% do tempo da simulação. São observadas duas regiões principais de acúmulo de água, onde a inundação perdurou por mais de 50% do tempo, que estão destacadas pela cor azul. Para chuvas de 10 anos, com inundação mais superficial, estão mais presentes áreas com baixa porcentagem de inundação, mas regiões com inundação próximas a 40% aparecem em destaque.

O mapa de classes de porcentagem de inundação mostra o percentual inundado em 5 classes: a primeira que vai de 0 a 20%, a segunda de 20 a 40%, a terceira de 40 a 60%, a quarta de 60 a 80% e a quinta de 80 até os 100%. Para tempos de recorrência de 100 anos, nota-se que a classe 4 encontra-se concentrada em duas áreas principais, bem delimitadas no mapa, já que a 2 e a 3 estão presentes em regiões mais divergentes. Já para o evento de 10 anos de recorrência, a predominância é da classe de inundação 3, que encontra-se presente em uma região central, com presença da 2 e 4 em locais diversos do mapa.

Já o mapa de profundidade máxima por pixel confirma a tendência observada nos gráficos anteriores, servindo para ilustrar o resultado espacialmente, pois as maiores profundidades se encontram nos locais mais densamente inundados. Para tempos de recorrência de 100 anos, predominam profundidades entre 0,1 e 1,5 metros, com bastante presença da faixa entre 0,1 e 0,5 metros. Para chuvas de 10 anos de recorrência, a grande parte da área inundada se mantém entre 0,1 e 0,5 metros de profundidade, sendo que a área de maior profundidade encontra-se concentrada em apenas uma região.

O instante de tempo que a profundidade máxima foi alcançada pode ser observado no mapa subsequente, constatando áreas distintas e delimitadas de faixas de tempo para a inundação. Para eventos de 100 anos de recorrência predominam inundações que alcançaram sua profundidade máxima entre 1- 40 minutos e 40- 55 minutos, com pouca presença de outras faixas de tempo. Já

para o tempo de recorrência de 10 anos, a classificação entre 55- 70, que não se sobressai no evento de 100 anos, é muito presente, juntamente com os tempos entre 1- 40 minutos e 40 -55 minutos. O destaque para o tempo de profundidade máxima acima dos 55 minutos para chuva de 10 anos de recorrência foi justificado na Figura 6, que mostra as profundidades integradas no espaço, pois nota-se que o evento de 10 anos de recorrência gasta um tempo maior para chegar à sua profundidade máxima do que o evento de 100 anos de recorrência.

As profundidades específicas (df – no caso da figura o valor para demonstração foi de 0.1 m), servem para analisar situações mais singulares da inundação, dando atenção maior ao intervalo escolhido. Como o valor de df corresponde a Pref, que é a profundidade mínima de inundação, a grande maioria da área encontra-se inundada. E como são gerados 98 mapas, o gráfico da porcentagem é quase semelhante ao do tempo.

Para chuvas de 100 anos, a profundidade acima de df (0.1 metros), é verificada de 35 a 80% em quase todo o mapa: de 65 a 80% do tempo na parte inferior do mapa, 55 a 65% na parte central e 35 a 55% no exutório da bacia. Para 10 anos, a predominância ainda é 30 a 85%, mas dessa vez o intervalo 55 a 65% aparece com mais destaque e a porcentagem 65 a 80% possui uma área menor.

O tempo que a inundação permaneceu acima de df, para 100 anos de recorrência, ficou dividido para regiões distintas do mapa, com presença dos intervalos 35-55 minutos, 55-65 minutos e 65-98 minutos, de acordo com a região da inundação. O mesmo acontece no evento de 10 anos de recorrência.

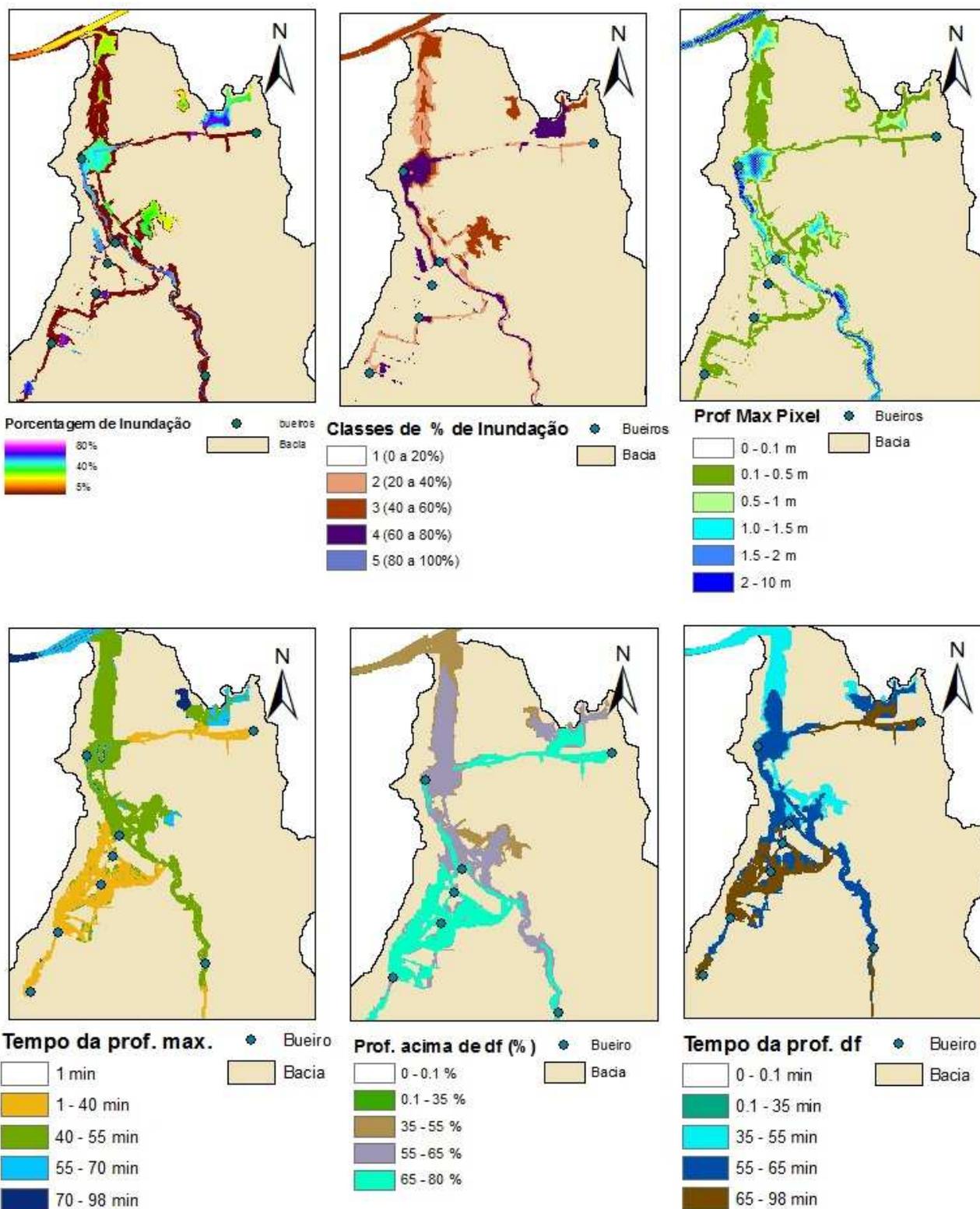


Figura 7- Mapas gerados pelo algoritmo de pós-processamento de resultados, para o evento de tempo de recorrência de 100 anos, sobrepostos à delimitação da Bacia Moinho de Areia e aos bueiros.

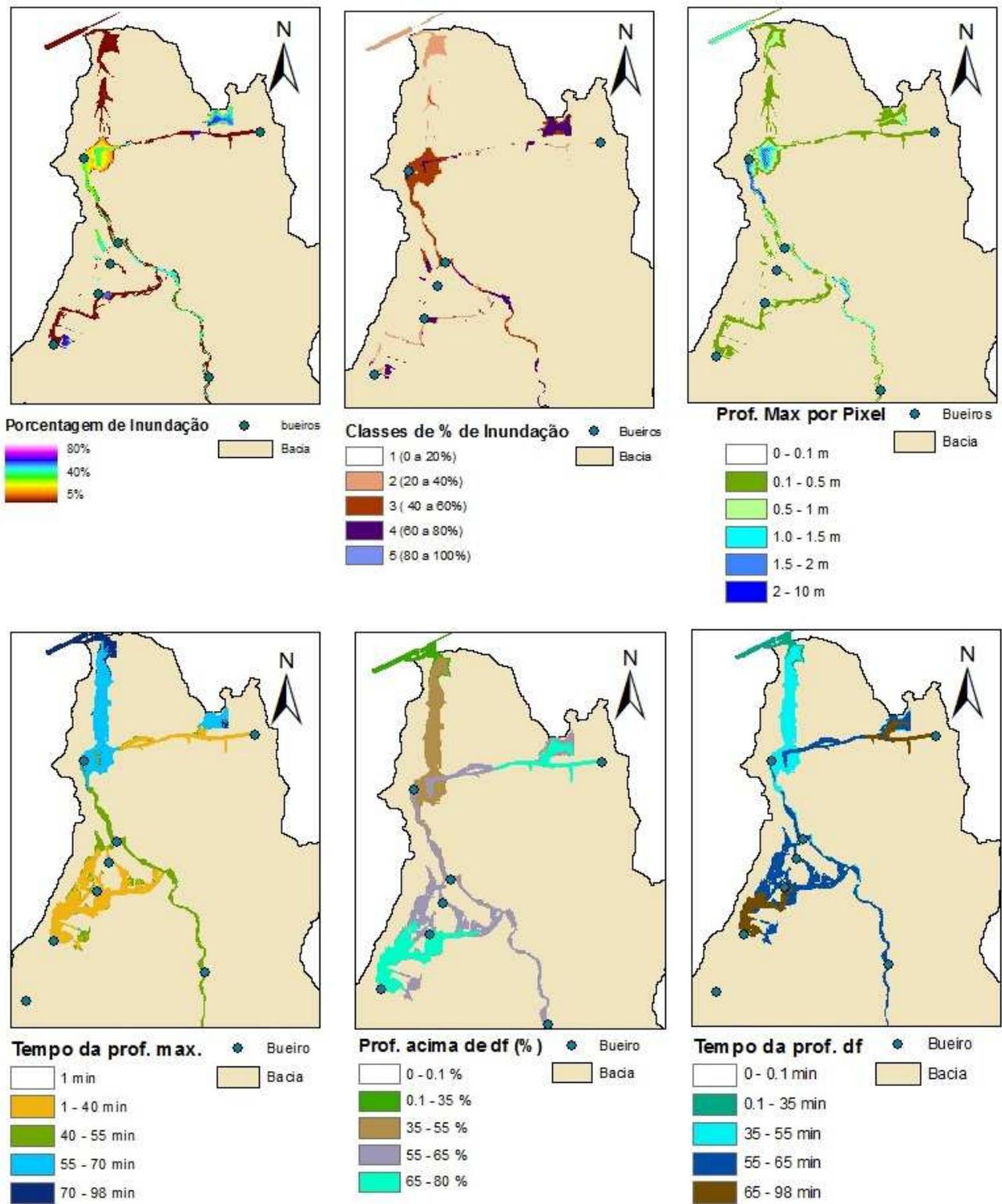


Figura 8- Mapas gerados pelo algoritmo de pós-processamento de resultados, para o evento de tempo de recorrência de 10 anos, sobrepostos à delimitação da Bacia Moinho de Areia e aos bueiros.

Outro resultado interessante da rotina de pós-processamento é a geração de resultados para cada bueiro separadamente, dando condições para se verificar o volume, a extensão e as profundidades da inundação que cada bueiro individualmente contribui.

A Figura 9 mostra a contribuição de 3 bueiros, dos 10 presentes na simulação. O bueiro 3, localizado na região mediana da bacia, nas proximidades do bueiro 2; o bueiro 5, localizado na região inferior, que escoam até as proximidades do bueiro 1; o bueiro 8, que escoam até a região externa à bacia, onde a água fica acumulada. A direção do escoamento é orientada através das elevações de terreno e do traçado das ruas. Em tal figura, são apresentadas as inundações decorrentes dos dois eventos simulados (tempo de retorno de 10 e 100 anos). Observa-se que, para o bueiro 5, as áreas inundadas nos dois eventos foram bastante similares entre si. Para o bueiro 3 e, principalmente, para o bueiro 8, o evento de TR = 100 anos resultou em inundações bem mais extensas do que para o evento de TR = 10 anos.

É importante perceber, entretanto, que analisar a inundação gerada por cada bueiro separadamente não corresponde à inundação conjunta de todos eles, já que a junção das inundações é que produzirão um maior escoamento, acarretarão em maiores profundidades e em uma maior área inundada.

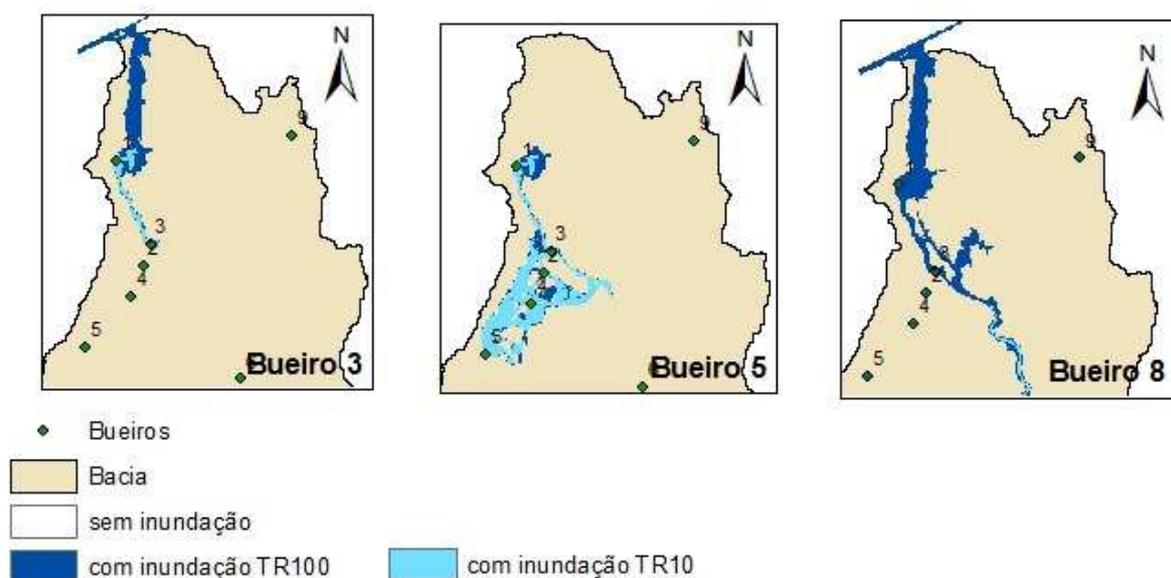


Figura 9 - Representação gráfica das inundações individuais devido ao extravasamento dos bueiros 3, 5 e 8, respectivamente, para os eventos de tempo de retorno (TR) 100 e 10 anos.

## **CONCLUSÕES**

A elaboração do algoritmo de pós-processamento de resultados para cálculo de áreas e outras variáveis de interesse foi imprescindível para gerar resultados numéricos sobre as simulações do modelo 2D de inundação. Já que cada rodada do modelo 2D dá origem a dezenas ou até mesmo centenas de mapas (dependendo do intervalo de tempo simulado), a análise manual desses mapas é uma atividade repetitiva, demandando muito tempo e, em contrapartida, sem somar nada no aprendizado do modelador.

No estudo de caso, a discretização temporal foi de 1 minuto, ou seja, a cada minuto de simulação era gerado um mapa. O intervalo de discretização pode ser escolhido de acordo com o interesse e características da área modelada e do período de simulação.

O desenvolvimento da ferramenta computacional de análise desses mapas permite agilizar os resultados e o aprimoramento do modelo, além de extrair de forma automatizada informações sobre variáveis pré-selecionadas. Conforme o interesse do usuário há possibilidade de implementar estrutura do código do programa o cálculo de informações adicionais.

A rotina de pós-processamento de resultados permitiu a investigação mais rápida e de variáveis que não são comumente exploradas na análise do modelo bidimensional de inundação, por não terem seu cálculo imediato ou demandar mais conhecimento das operações em softwares de geoprocessamento específicos. Os mapas integrados ao ambiente de SIG (Sistema de Informação Geográfica) podem ser modificados e manipulados para dar uma visão melhor e focalizada de algumas variáveis que se quer observar, além de oferecer uma visão espacial, permitindo que medidas sejam tomadas para resolver a questão das inundações. Isso tem grande potencial para identificar o padrão espaço-temporal de inundações de forma mais ampla, enxergando aspectos muitas vezes omitidos das análises, como o instante de tempo em que cada parte da bacia alcançou a profundidade máxima.

A análise automatizada dos mapas demanda um tempo menor e permite que várias rodadas no do programa sejam executadas de uma só vez. Os resultados são dados úteis para incorporação em sistemas para fins de previsão e alerta, ajudando na tomada de decisões para resolver os problemas causados pelas inundações urbanas.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao LABGEO (Laboratório de Geoprocessamento, Centro de Ecologia) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao prof. Alfonso Risso do IPH-UFRGS por ceder o Modelo Digital de Elevação utilizado neste estudo.

Ao CNPq que disponibilizou as bolsas de iniciação científica as duas primeiras autoras.

## BIBLIOGRAFIA

- ACKERMAN, C.T.; DJOKIC, D.; SINHA, A. (2005). *HEC-GeoRAS, GIS tools for support of HEC-RAS using ARC-GIS*, User's manual version 4, 204 p.
- BATES ,P.D. e DE ROO A.P. (2000) "A simple raster-based model for flood inundation simulation". *Journal of Hydrology*, Vol. 236 , pp 54-77.
- CUNGE, J.A.; HOLLY, F.M.; VERWEY, A. (1981). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing, Boston (EUA), pp 420 .
- FREAD, D.L. (1992). *Flow Routing*. In: *Maidment*. D. R. (ed.) *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill.
- HELLWEGER, F.L.; MAIDMENT, D.R. (1999). "Definition and connection of hydrologic elements using geographic data". *Journal of Hydrologic Engineering* 4(1), pp 10-18.
- MAIDMENT, D.R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. ESRI, Imprensa Redlands, Califórnia (EUA), pp 203 .
- MERKEL, W.H.; KAUSHIKA, R.M.; GORMAN, G. (2008). *NRCS GeoHydro - A GIS interface for hydrologic modeling*. *Computers & Geosciences* 34, pp 918-930.
- OLIVEIRA, F.; VALENZUELA M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H.; KOKA, S.; AGRAWALL, A. (2006). "ArcGIS-SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT". *Journal of the American Water Resources Association* 42(2), pp 295-309.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. (2007). "River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model". *Journal of Hydrology* 343, pp 127-139.
- PAZ, A.R., MELLER, A. and SILVA, G.,(2011). "Coupled 1D-2D hydraulic simulation of urban drainage systems: model development and preliminary results", in 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brasil.
- PAZ, A.R., COLLISCHONN,W., TUCCI, C.E.M.; PADOVANI, C.R. (2011), "Large-scale modeling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil)", *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 9, pp 1498-1516.
- PAZ, A.R.; MELLER, A.; COSTA, A.H.A.; ANDRADE, C.O.(2012). "Simulação de inundações urbanas na bacia do Arroio Moinho da Areia (Porto Alegre)", in XV SILUBESA, Belo Horizonte.
- PORTO ALEGRE. (2002). Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Bacia do Arroio Areia. v. 4. Porto Alegre: UFRGS/IPH.