

**XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004**

**COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO DE  
INUNDAÇÕES EM REDES DE DRENAGEM PLUVIAIS APLICADAS A  
UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA EM URBANIZAÇÃO**

**Adalberto Meller<sup>\*</sup>, Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva<sup>\*</sup>**

<sup>\*</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Cidade Universitária  
CEP 97105-900, Santa Maria-RS, Brasil. Email: [betomeller@uol.com.br](mailto:betomeller@uol.com.br), [eloiza@ct.ufsm.br](mailto:eloiza@ct.ufsm.br)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta a comparação de duas metodologias para simulação de inundações em rede de drenagem pluviais, aplicadas a uma pequena bacia hidrográfica em Santa Maria-RS, divididas em dois cenários. O Cenário 1 descreve o escoamento na rede de condutos pluviais. No caso de inundação da rede, é utilizada a técnica padrão do aplicativo MOUSE, a qual consiste no armazenamento da inundação em reservatórios artificiais localizados sobre a cota do topo dos poços de visita. O Cenário 2 integra, adicionalmente ao Cenário 1, a rede de ruas da bacia hidrográfica. Foram observadas diferenças significativas nas simulações. O Cenário 2 produziu os melhores resultados, tanto em relação aos hidrogramas de saída da bacia como na simulação dos níveis máximos de inundação. O Cenário 1, ao contrário, subestimou significativamente os picos dos hidrogramas e superestimou os níveis de inundação sobre os poços de visita. As diferenças nos resultados das simulações se devem principalmente as características do sistema de drenagem na área urbana na bacia, que prioriza o escoamento através das ruas ao armazenamento localizado das inundações.

**ABSTRACT:** This work presents the comparison of two methodologies for flood simulation in pipe networks, applied to a small catchment in Santa Maria-RS, divided in two scenarios. Scenario 1 describes the flow in the pipe network. In the case of flood, the default technique of software MOUSE is used, which consists in storage of the flood in artificial reservoirs attached on the top of the manhole. Scenario 2 has additional street network to the system of Scenario 1. Significant differences were observed in the simulations. Scenario 2 produced best results in relation to the catchment hydrograph and the maximum flood levels. Scenario 1 underestimated the peak flow of hydrograph and overestimated the flood levels over the manholes. The differences in the results of the simulations are related mainly to the characteristics of the drainage system in the catchment urban area, which prioritizes the flow through the streets to the located storage of the floods.

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação hidrodinâmica, inundações, drenagem urbana.

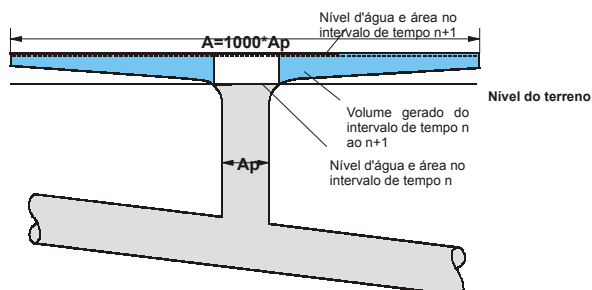
## INTRODUÇÃO:

A modelagem matemática associada à simulação computacional tem se mostrado, nas últimas décadas, uma ferramenta indispensável no planejamento, dimensionamento e operação da drenagem urbana. Para simulação quantitativa do escoamento, os aplicativos para simulação da drenagem urbana, em geral, incluem basicamente dois componentes sequencialmente conectados: um modelo hidrológico para transformação da precipitação em escoamento superficial e um modelo hidráulico para propagação do escoamento em redes de condutos e canais. Os modelos que descrevem a propagação do escoamento na rede geralmente utilizam as equações de Saint Venant em sua forma completa e são chamados hidrodinâmicos. Embora outras formulações sejam passíveis de utilização, alguns fenômenos que ocorrem em redes de condutos, especialmente sob condições críticas, como inversões de fluxo, efeitos de jusante e escoamento sob pressão, somente podem ser contemplados com a utilização desses modelos.

Os primeiros modelos hidrodinâmicos de simulação de redes surgiram no final da década de 60. Especialmente nesta década, surgiram vários trabalhos no intuito de validação das equações de Saint Venant para utilização em modelos de propagação do escoamento em redes de condutos. Hoje, a maioria dos modelos hidrodinâmicos de redes integram aplicativos comerciais, entre os quais podem ser citados o SOBEK-Urban (Heeringen et al, 2002), o InfoWorks CS (Chan & Vass, 2002) e o MOUSE v.2003 (DHI, 2003a). Embora os primeiros modelos tenham surgido com objetivo de simulação e verificação de redes, com a rápida evolução da informática passaram também a ser utilizados para simulação de inundações em áreas urbanas, especificamente as relacionadas a ineficiência hidráulica das redes de condutos. Nesse aspecto a contribuição dos modelos de drenagem urbana é significativa, fornecendo subsídios para o entendimento das causas e da dinâmica das inundações, balizando soluções econômicas, eficientes e sustentáveis na bacia hidrográfica.

Várias técnicas para simulação de inundações têm sido desenvolvidas e utilizadas com sucesso na última década, as mais robustas geralmente integrando o SIG a modelos de propagação do escoamento na superfície em duas dimensões. Entretanto, dependendo das características do sistema de drenagem, da densidade de ocupação das áreas urbanas e da origem das inundações, metodologias mais simples podem resultar em resultados mais consistentes. Duas metodologias serão abordadas neste trabalho: uma prioriza o armazenamento do excesso de escoamento não comportado pela rede de condutos, e a outra visa a condução através da superfície do terreno, permitindo a interação entre as estruturas da rede.

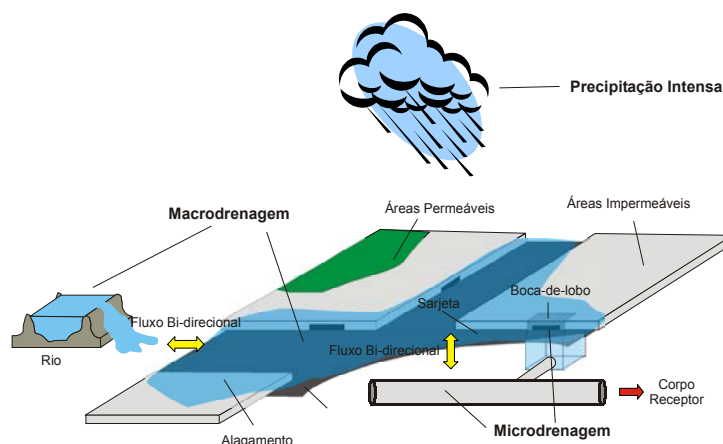
O armazenamento do excesso escoado é a metodologia mais simples de simulação de inundações na rede, geralmente adotada como padrão pelos modelos hidrodinâmicos de redes de drenagem pluvial. A técnica consiste em armazenar a inundação que ocorre no poço de visita em um reservatório artificial sobre a cota do terreno, que pode ter diferentes geometrias, de forma a reproduzir a curva cota-volume da superfície inundada, ou uma geometria padrão, sem relação com o relevo da superfície do terreno. O volume armazenado durante o período de inundação, volta então, gradativamente a rede, conforme haja novamente capacidade de escoamento. A Figura 1 mostra o esquema padrão utilizado pelo modelo MOUSE v.2003 (DHI, 2003a). O modelo utiliza um reservatório de geometria circular, com diâmetro igual a 1000 vezes a área da seção transversal do poço de visita, que poderá ser preenchido até um volume máximo correspondente a cota de 10 metros.



**Figura 1. Metodologia de armazenamento de inundações no poço de visita, utilizada pelo aplicativo MOUSE. Fonte: DHI, 2003a.**

A integração do escoamento das inundações através da superfície vem sendo atualmente incorporado ao processo de modelagem da drenagem urbana, e baseia-se no conceito de drenagem integrada (“Dual-Drainage”, originalmente). Segundo Djordjevic et al (1999) um modelo de drenagem integrada possui duas partes interativas, ou duas redes. A parte subterrânea consiste na rede de condutos pluviais, constituída por

poços de visita, bocas-de-lobo e estruturas de controle. A parte superficial é formada por canais naturais, áreas de retenção do escoamento em depressões do terreno ou estruturas de controle artificiais. Os resultados das simulações do modelo são os hidrogramas de saída da rede de condutos, o volume de água que deixa o sistema ou fica armazenado em áreas de retenção e os níveis de inundação na superfície. A Figura 2 ilustra o funcionamento de um modelo de drenagem integrada.



**Figura 2. Modelo de um sistema utilizando o conceito de drenagem integrada.**

Embora o conceito de drenagem integrada tenha sido efetivamente introduzido a partir da década de 90, os primeiros trabalhos com esse propósito foram realizados no início da década de 80. Wisner & Kassen (1982) apresentaram um modelo hidrodinâmico simplificado, desenvolvido pela Universidade de Ottawa (OTTSWMM), que utilizava a teoria da onda cinemática para propagação do escoamento na rede de condutos e ruas. Era composto por quatro sub-modelos: o de transformação chuva-vazão (escoamento superficial), um modelo para propagação do escoamento na rede de condutos e outro na superfície e um modelo específico para considerar a capacidade de engolimento das bocas-de-lobo, de modo a permitir a interação os dois sub-modelos anteriores.

Boonya-aroonnet et al (2002) apresentou uma comparação de mapas de inundação gerados a partir de três cenários distintos para o sistema de drenagem urbana da região do Central Business District, em Bangkok, utilizando o aplicativo MOUSE. Para construção dos cenários foram utilizadas três metodologias integradas com o SIG, assim definidas: Cenário A: técnica padrão do aplicativo MOUSE, de armazenamento das inundações em reservatórios artificiais; Cenário B: a integração entre a rede de condutos e ruas; Cenário C: adicionalmente ao Cenário B, o autor considerou as inundações de áreas adjacentes às ruas através do MNT, no caso de superação da cota do meio-fio. Os mapas de inundação foram construídos a partir de rotinas de interpolação dos valores máximos dos níveis de inundação, realizadas pelo software MIKE 11 GIS. Os resultados das simulações, comparados com as informações de campo sobre os níveis de inundação, mostraram que o Cenário C apresenta os melhores resultados. Os autores sugerem ainda a aplicabilidade do Cenário A somente para simulação de eventos de chuva de fraca intensidade e Cenário B a eventos de intensidade moderada.

Tomicic et al (1999) utilizou o aplicativo MOUSE em um estudo de mitigação de cheias em Playa de Gandia, na região costeira do mar mediterrâneo, na Província de Valência na Espanha. A localidade de Playa de Gandia tem aproximadamente 189 ha de área intensivamente urbanizada e é drenada por complexo sistema de drenagem combinado, com condições de drenagem gravitacional desfavoráveis, incluindo estações de bombeamento que recalcam o esgoto doméstico para uma ETE. Para simulação do sistema a área de 189 ha foi dividida em 320 sub-bacias, subdivididas em áreas que englobam quadras e calçadas e áreas correspondentes à superfície das ruas. O modelo de propagação do escoamento foi construído em duas camadas, compreendendo o escoamento nas ruas e na rede de condutos. Como resultado das simulações os autores identificaram uma série de medidas estruturais e operacionais necessárias ao sistema baseadas em mapas de inundação.

Meller (2004) avaliou o sistema de drenagem do Parque Residencial Alto da Colina, em Santa Maria-RS, sujeito a inundações. Através da utilização do aplicativo MOUSE o autor construiu o sistema de drenagem da bacia em duas camadas, uma para a rede de condutos e outra para rede de ruas, conectadas através de relações de vertedores. Entre outras informações, o autor apresenta o resultado da simulação de 5

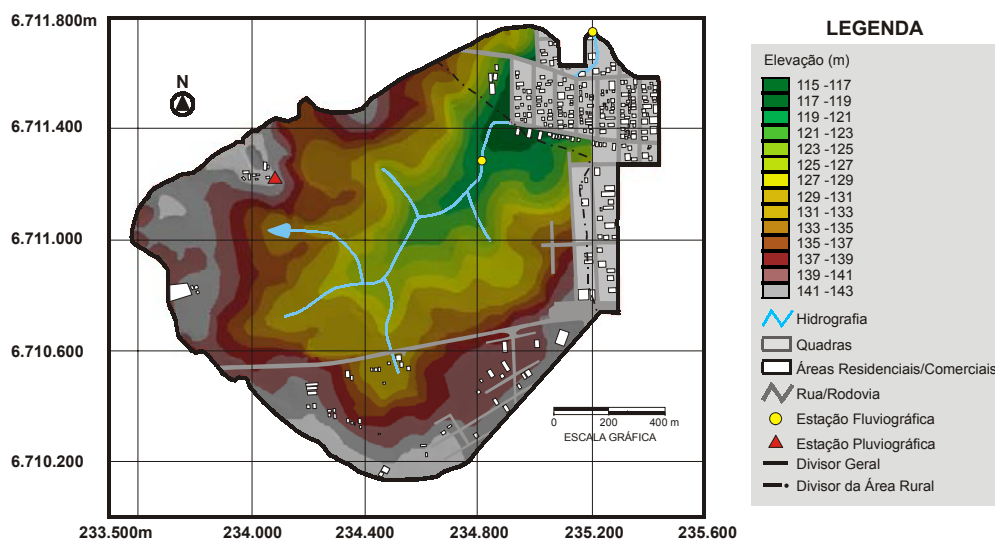
eventos que causaram inundações com bons resultados na comparação dos níveis máximos de inundação simulados e observados nas ruas. Na comparação entre os hidrogramas observados no exutório da bacia os erros médios calculados para os eventos simulados foram de 3,8% e 11,8% , respectivamente, para as vazões de pico e volume escoados.

## OBJETIVOS:

Esse trabalho tem como objetivo a comparação de duas metodologias para simulação de inundações em rede de drenagem pluviais, e seus efeitos sobre os níveis de inundação nos poços de visita e hidrogramas em uma pequena bacia hidrográfica em Santa Maria-RS. Embora as diferenças entre metodologias possam ser entendidas com base nas informações apresentadas, a quantificação dos resultados permite a obtenção de informações importantes com relação as limitações, vantagens e eficiência das aproximações, fornecendo subsídios para futuros usuários.

## DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO:

A bacia hidrográfica Alto da Colina situa-se na região centro-leste do município de Santa Maria-RS, próximo ao CAMPUS da Universidade Federal de Santa Maria. Possui área de 190 ha e ocupa três bairros da cidade: Camobi, São José e Pains, entre as coordenadas 53°44'11,5'' e 53°43'41'' de longitude oeste e 29°41'47'' e 29°38'47'' de latitude sul. O monitoramento na bacia é realizado através de três estações: duas estações fluviográficas e uma estação pluviográfica, com localizações apresentadas na Figura 3.



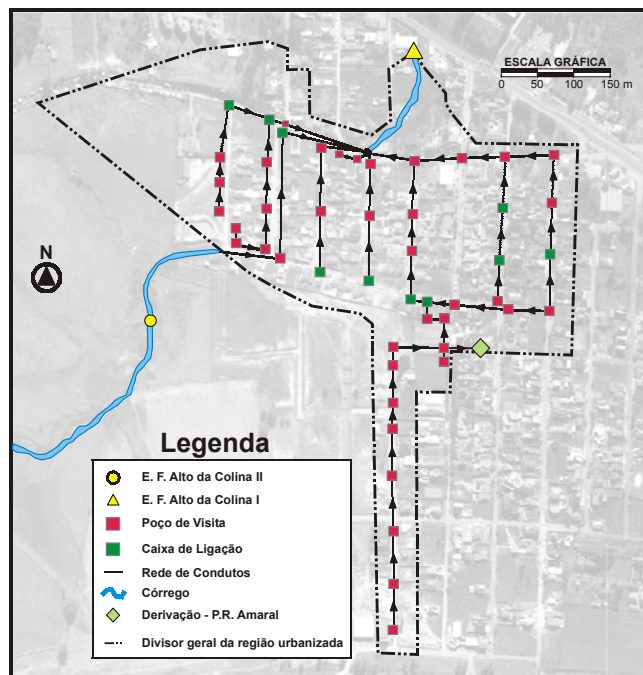
**Figura 3. Mapa plani-altimétrico da bacia Alto da Colina.**

A bacia é predominantemente rural, com áreas densas de urbanização concentradas próximo a foz. A rede de drenagem pluvial da bacia possui aproximadamente 3510m, com diâmetros mínimo e máximo de 0,20 e 1,20m, respectivamente. Os condutos, em geral, apresentam-se locados sob a via pública e são constituídos em concreto. A Figura 4 localiza a rede de condutos dentro da área urbana da bacia.

As ruas são pavimentadas em alvenaria poliédrica de basalto, não existindo trechos de ruas asfaltadas. Há a presença em alguns casos de pequenos trechos em solo compactado ou parcialmente revestido com blocos irregulares de pedra, derivados da deterioração da pavimentação original devido à ação física das chuvas e das enchentes no local. Ao todo fazem parte do sistema de drenagem da bacia 10 ruas do Parque Residencial Alto da Colina e 1 rua do Parque Residencial Amaral, com declividades médias respectivamente de 0,013 e 0,034 m/m.

## PROBLEMÁTICA:

Na ocorrência de chuvas de maior intensidade a região do Parque Residencial Alto da Colina, que ocupa a maior parte da área urbana da bacia, apresenta pontos de alagamento que provocam a interrupção do tráfego, inundações de residências e se tornando um possível foco de transmissão de doenças à população residente.



**Figura 4. Mapa de localização das estruturas do sistema de microdrenagem na área urbana.**

As inundações na região da bacia derivam de um processo bem conhecido: expansão urbana desordenada aliada à ineficiência do sistema de microdrenagem em pontos localizados da rede. A Figura 5 mostra os principais locais de alagamento na área em estudo.



**Figura 5. Principais locais de inundação na bacia.**

Os alagamentos de maiores proporções ocorrem preponderantemente como resultado do sub-dimensionamento do trecho em que o córrego que drena a região rural se conecta a rede de drenagem pluvial. O trecho canalizado possui diâmetro de 1,20m, para escoamento de vazões observadas no período de quatro anos de monitoramento na ordem de  $8\text{m}^3/\text{s}$ . Ainda ocorrem pequenos alagamentos localizados, devido exclusivamente ao sub-dimensionamento das estruturas de captação e condução do escoamento da rede.

## **METODOLOGIA:**

De modo a estabelecer as diferenças entre técnicas de simulação de inundações na bacia Alto da Colina, dois cenários foram construídos com base em informações levantadas em campo:

**CENÁRIO 1:** Descreve o escoamento através microdrenagem, que consiste na rede de condutos, poços de visita e canais naturais abertos de macrodrenagem. Para a simulação dos hidrogramas de escoamento superficial, a bacia foi dividida em duas partes: área rural e área urbana. A contribuição da área rural da bacia é simulada de maneira concentrada e a da área urbana discretizada em 47 sub-bacias de contribuição. Os hidrogramas assim determinados são propagados na rede através do modelo hidrodinâmico. No caso de inundação da rede de microdrenagem é utilizada a técnica padrão do aplicativo MOUSE, que utiliza reservatórios artificiais, localizados sobre a cota do topo dos poços de visita, para armazenamento das inundações. Essa simulação não leva em conta a propagação das inundações através das ruas, apenas armazena, de forma localizada, o volume inundado até que a rede tenha novamente capacidade de transporte. A Tabela 1 apresenta algumas informações sobre as áreas de contribuição simuladas no processo de



transformação precipitação-vazão.

**Tabela 1. Características gerais das áreas de contribuição.**

Área	Área (ha)	Subdivisão	IMP* (%)	Tempo de Concentração (min)
Urbana	28	47	60	1**
Rural	162	-	7	150

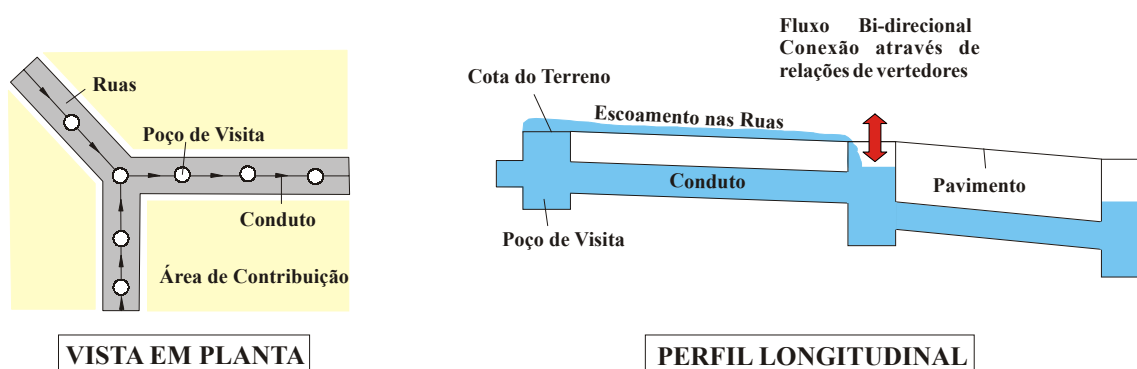
\* áreas impermeáveis; \*\* tempo de concentração individual para as áreas urbanas de contribuição.

**CENÁRIO 2:** Adicionalmente ao Cenário 1, inclui a rede de ruas da bacia hidrográfica. A conexão entre as redes é realizada através de relações de vertedores, com crista da soleira posicionadas na cota de topo dos poços de visita. No caso de superação da capacidade hidráulica da rede, o excesso de escoamento é propagado através da rede de ruas pelo modelo hidrodinâmico, permitindo a obtenção de uma descrição detalhada das condições hidráulicas de escoamento. As ruas, nesse caso, são representadas através de canais abertos com seção transversal proveniente de informações de campo. A Tabela 2 apresenta os elementos utilizados na construção dos cenários 1 e 2, e a Figura 6 apresenta um esquema ilustrativo do Cenário 2.

**Tabela 2. Descrição dos elementos constituintes dos cenários.**

Número de Estruturas	Cenário 1 (Reservatório Artificial)	Cenário 2* (Simulação Integrada nas Ruas)
Áreas de Contribuição	47	47
Poços de Visita	52	52
Nós de Ruas	0	37
Condutos Circulares	53	53
Vertedores	0	45
Canais Abertos /Trechos de Ruas	1	42
Pontos de Saída da Rede	2	2

\*Fonte: Meller, 2004.



**Figura 6. Representação esquemática da modelagem dos processos no Cenário 2.**

Para simulação do sistema foram utilizados três modelos, dois hidrológicos precipitação-vazão e um hidrodinâmico para propagação do escoamento na rede e na superfície, integrantes do aplicativo MOUSE v.2003. Os modelos são descritos a seguir:

**MODELO A:** baseia-se no método da curva “tempo-área”, que utiliza os conceito de isócronas e de histograma tempo-área para propagação superficial do escoamento (DHI, 2003b). O volume produzido pelo método é controlado por três parâmetros: perdas iniciais, área impermeável e perda hidrológica contínua. Este modelo foi aplicado na área urbana da bacia, com bons resultados.

**MODELO C2:** basicamente utiliza a teoria do reservatório linear, dividida em duas variantes. Para bacia com áreas impermeáveis maiores que 20% o modelo utiliza a teoria do reservatório linear em conjunto com um algoritmo para separação do escoamento que utiliza o modelo de infiltração de Horton, as perdas iniciais

e um parâmetro de redução hidrológica. Para áreas impermeáveis menores que 20%, a determinação da chuva efetiva é feita com base em dois parâmetros: perdas iniciais, no início da simulação, e uma taxa de perdas contínuas ao longo do evento. O modelo não inclui explicitamente as perdas causadas pela evaporação e evapotranspiração. Adicionalmente para simulações contínuas, estas influências podem ser consideradas por um módulo adicional no aplicativo, o módulo MOUSE RDII, não utilizado. A propagação do escoamento é realizada através de dois reservatórios lineares em série, com mesma constante de tempo. A variante para porcentagem de áreas impermeáveis menores que 20% foi a utilizada na simulação da contribuição rural da bacia, que tem porcentagem de áreas impermeáveis de 7%.

**MOUSE HD:** o modelo resolve as equações unidimensionais do escoamento à superfície livre (equações de Saint Venant) permitindo a simulação de redes multiplamente conectadas, inversões de fluxo, bacias de retenção, operações com bombas, coeficientes de atrito variáveis nos condutos e perdas de carga em poços de visita. Para simulação do escoamento supercrítico as equações completas de Saint Venant são reduzidas à aproximação da onda de difusão, e a simulação do escoamento sob pressão é realizada através da Fenda de Preissmann. O método de resolução das equações de Saint Venant é baseado em um esquema numérico implícito de diferenças finitas de seis pontos, conhecido como esquema de Abbott.

### **SIMULAÇÕES:**

A análise dos resultados se concentrou no efeito da utilização das metodologias sobre duas informações de saída do sistema julgadas mais importantes: nível máximo de inundação sobre os poços de visita da rede e o hidrograma de saída da bacia. Como dados de entrada foram utilizados quatro eventos extremos de precipitação ocorridos no período de 07/2001 e 06/2003, para os quais também existem hidrogramas observados na saída da bacia. Para avaliação dos níveis máximos nas simulações, entretanto, foi utilizado somente o evento do dia 10/03/2003. Como informações adicionais foram utilizados níveis históricos de inundação observados em quatro pontos do sistema de ruas.

Ainda com relação a avaliação dos níveis máximos, somente é realizada a comparação nos poços de visita que interagem efetivamente com os problemas de inundação da bacia (ao todo 39), sendo que no Cenário 1 os níveis de inundação correspondem ao nível máximo do reservatório artificial, e no Cenário 2, ao nível máximo do nó do sistema de ruas aos quais se conectam.

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO:**

As simulações, de modo geral, mostraram diferenças significativas. Nas simulações do Cenário 1, pode-se observar que em média 50% do volume gerado na bacia, logo após o início do escoamento superficial, fica armazenado nos reservatórios artificiais sobre os poços de visita, causando grandes amortecimentos nas vazões de pico dos hidrogramas na saída da bacia, como mostra a Tabela 3. Observando a Figura 7, que apresenta os hidrogramas simulados e observados, nota-se que a capacidade máxima de condução do sistema analisado no Cenário 1 fica limitada a aproximadamente a  $2,5\text{m}^3/\text{s}$ , bem abaixo dos valores observados nos eventos de cheia utilizados. Essa limitação ocorre especialmente pela desconsideração do escoamento sobre as ruas, que em alguns locais, durante eventos de grande intensidade, transportam vazões significativamente maiores que as suportadas pela rede de condutos.

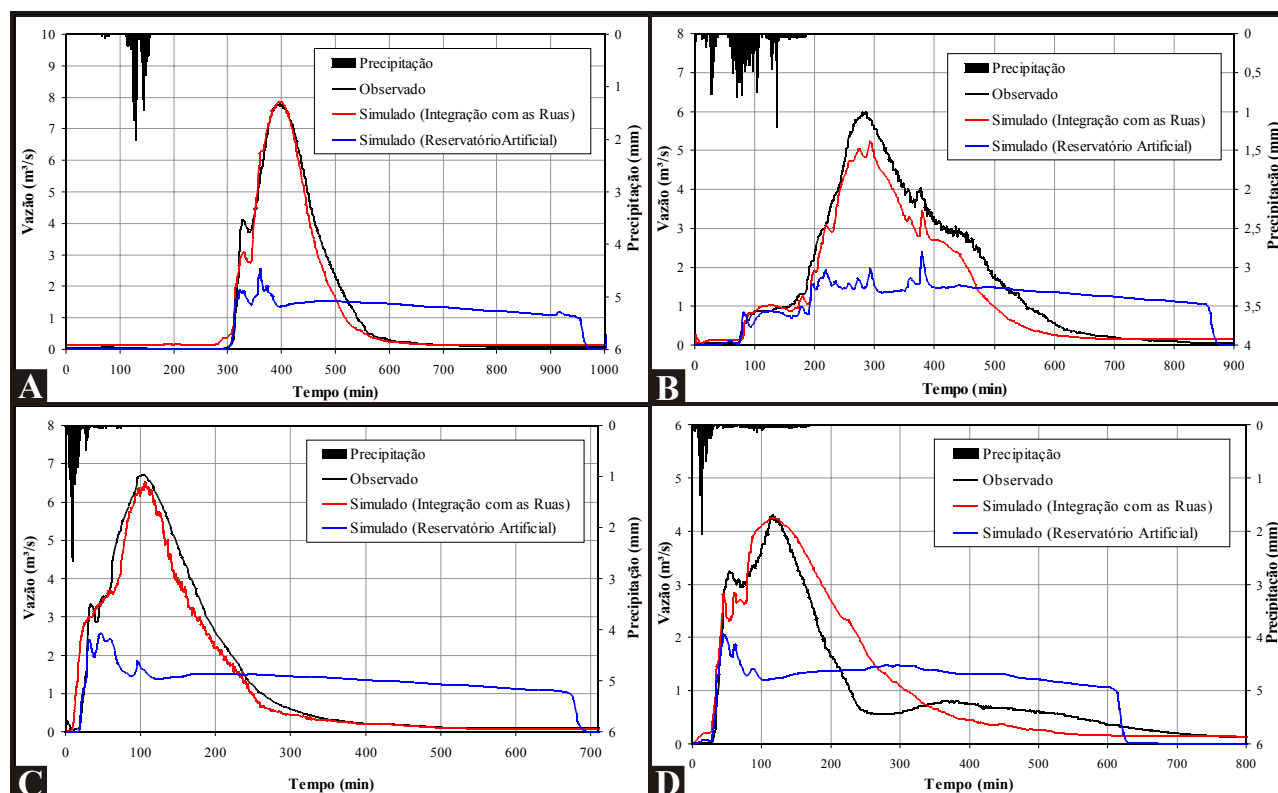
Os erros médios cometidos na determinação das vazões de pico foram, respectivamente, 57% e 3%, para os cenários 1 e 2, mostrando que, nesse sentido, o Cenário 2 produz bons resultados. Com relação ao cálculo do volume escoado não há diferença significativa entre os cenários, porque os parâmetros relacionados aos algoritmos de separação do escoamento, nos modelos de transformação precipitação-vazão, são iguais. As pequenas diferenças existentes são devidas ao procedimento de inicialização do modelo hidrodinâmico, que utiliza uma lâmina mínima para início da simulação igual a 0,5% da dimensão característica do conduto ou canal, mas não superior a 5mm.

As diferenças encontradas nas simulações se devem principalmente as características do sistema de drenagem na área urbana na bacia. A rede de ruas apresenta declividade moderada, com direção de escoamento convergindo para a saída da rede de microdrenagem, junto ao córrego. Na ocorrência de inundação na rede, há armazenamento superficial significativo em apenas alguns locais, sendo que a maior parte do volume excedente a rede escoar rapidamente através das ruas até o córrego, em concordância com o modelo do sistema de drenagem no Cenário 2.

**Tabela 3. Estatísticas das simulações com relação aos hidrogramas na saída da bacia.**

Eventos	R <sup>2</sup>	Vazão de Pico Observada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão de Pico Simulada (m <sup>3</sup> /s)	Erro na vazão de Pico (%)	Porcentagem do volume escoado, armazenado nos reservatórios artificiais (%)	Tempo de Simulação <sup>3</sup> (s)
19/7/2001 <sup>1</sup>	0,30	7,808	2,542	-67,4	66	6
19/9/2002 <sup>1</sup>	0,33	5,986	2,392	-60,0	44	4
10/3/2003 <sup>1</sup>	0,29	6,543	2,591	-60,4	48	4
16/6/2003 <sup>1</sup>	0,33	4,315	2,070	-52,0	41	7
19/7/2001 <sup>2</sup>	0,98	7,808	7,849	0,5	-	7
19/9/2002 <sup>2</sup>	0,98	5,986	5,238	-12,4	-	8
10/3/2003 <sup>2</sup>	0,96	6,543	6,714	2,6	-	5
16/6/2003 <sup>2</sup>	0,88	4,315	4,248	-1,5	-	8

<sup>1</sup>Reservatório Artificial <sup>2</sup>Escoamento integrado nas ruas (Fonte: Meller (2004)) <sup>3</sup>Pentium IV CPU 1.8 GHz, 512 RAM



**Figura 7. Eventos Simulados. A. 19/07/2001, B. 19/09/2002, C. 10/03/2003 e D. 16/06/2003.**

O efeito sobre os níveis máximos de inundação nos poços de visita dos cenários podem ser observados na Figura 8, correspondente a simulação do sistema para o evento do dia 10/03/2003. Em relação aos níveis máximos observados em campo, os níveis apresentados no Cenário 1 são não-realísticos, com valores extremamente elevados, em pontos do sistema que comprovadamente não sofrem com problemas de armazenamento das inundações devido a declividade acentuada de algumas ruas.

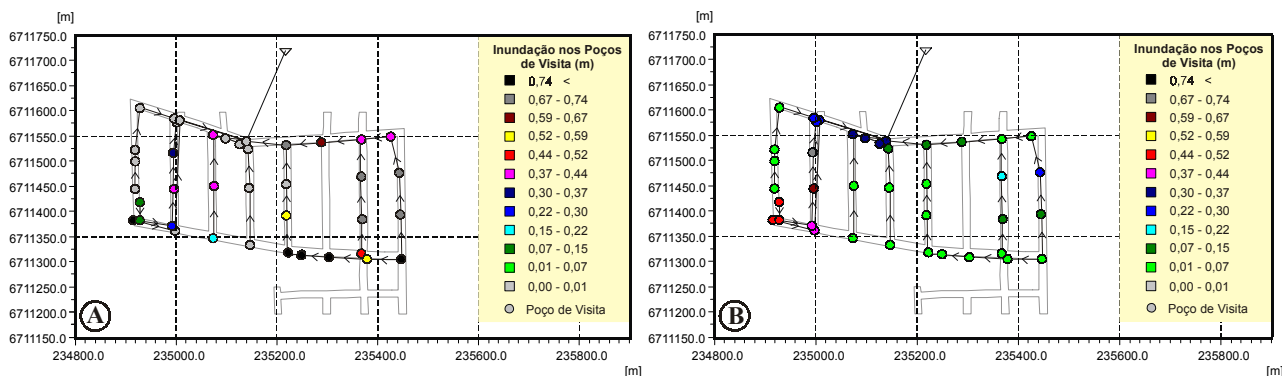
A Figura 9 mostra a comparação entre os níveis sobre os poços de visita, nos dois cenários. A porcentagem de poços de visita inundados no Cenário 1 é de 54% e no Cenário 2 de 72%, com níveis médios de inundação correspondentes de 43cm e 18cm. Isso ocorre porque a metodologia utilizada no Cenário 2 permite a interação entre estruturas, o que justifica o maior número de inundações porém com menores níveis médios que no Cenário 1, já que as ruas possuem grande capacidade de escoamento e possibilitam drenagem rápida do volume inundado. O erros médios nas simulações, com relação aos níveis máximos históricos observados nas esquinas, foram de 179% e 16%, respectivamente, para os cenários 1 e 2.

Quanto a eficiência na localização dos pontos críticos da rede, o Cenário 1 também apresentou distorções significativas. Nesta metodologia, as estruturas que apresentam maiores níveis de inundação são as que drenam maiores áreas de contribuição, o que não é necessariamente verdadeiro, uma vez que na

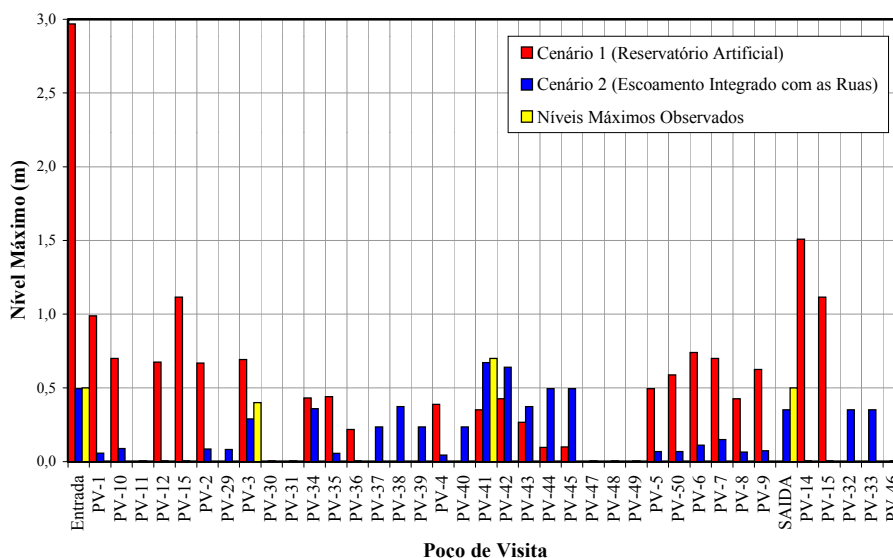


maioria dos casos as inundações que ocorrem nestes poços de visita, no caso do Parque Residencial Alto da Colina, são propagadas através das ruas, concentrando o volume excedente da rede nos pontos mais baixos do sistema.

Ainda observando a Figura 9, o nó denominado “entrada” apresenta no Cenário 1 um nível máximo próximo a 3,0m, quase seis vezes maior que o valor observado, de aproximadamente 50cm. Este nó refere-se ao local de entrada do hidrograma gerado na área rural da bacia na rede de condutos, e que contribui com maior porcentagem do volume escoado na saída da microdrenagem e também para os maiores problemas de inundação na bacia. A chegada da onda de cheia nesse nó provoca grandes armazenamentos no Cenário 1, devido a grande magnitude das vazões em comparação com a capacidade hidráulica da canalização, provocando níveis não realísticos.



**Figura 8. Inundação nos poços de visitas para o evento do dia 10/03/03 A. Cenário 1 B. Cenário 2**



**Figura 9. Comparação do nível máximo de inundação observado em 4 pontos do sistema com os resultados da simulação.**

## CONCLUSÕES:

O trabalho teve como objetivo a comparação entre duas metodologias utilizadas para simulação de inundações em redes, e avaliação de seus efeitos sobre os níveis de inundação nos poços de visita e hidrogramas de saída da rede, aplicados a uma pequena bacia hidrográfica em Santa Maria-RS. As metodologias foram divididas em dois cenários. O Cenário 1 descreve o escoamento na rede de microdrenagem utilizando a técnica padrão do aplicativo MOUSE, de armazenamento das inundações na rede em reservatórios artificiais sobre os poços de visita. O Cenário 2 integra, adicionalmente ao Cenário 1, o sistema de ruas da bacia hidrográfica, conectadas aos poços de visita através de relações de vertedores.

Foram observadas diferenças significativas nas simulações dos cenários, tanto com relação aos hidrogramas na saída da bacia, como na verificação dos níveis de inundação. Com relação ao hidrograma, pode-se observar que grande parte do volume escoado no Cenário 1 fica armazenado nos reservatórios artificiais, causando grandes amortecimentos nos hidrogramas, subestimando em média 57% as vazões de

pico. O Cenário 2, entretanto, apresentou bons resultados nas simulações, com erro médio na vazão de pico de 3%.

Na avaliação dos níveis de inundação sobre os poços de visita, os níveis determinados no Cenário 1 foram não-realísticos, com valores extremamente elevados em pontos do sistema que comprovadamente não sofrem com problemas de armazenamento de inundações. O Cenário 2 apresentou resultados mais convincentes, principalmente com relação aos locais de inundação e as magnitudes dos níveis máximos. O erros médios, com relação a determinação dos níveis máximos observados em quatro pontos do sistema, foram de 179% e 16%, respectivamente para os cenários 1 e 2.

Os resultados mostram que a metodologia utilizada no Cenário 2 tem grande aplicabilidade, e fornece em geral bons resultados, especialmente em sistemas que não possuem características de armazenamento das inundações. Entretanto a utilização fica limitada a sistemas em que não ocorram inundações em áreas adjacentes as ruas, pela superação da cota do meio-fio. Nesse caso, a metodologia poderá superestimar os níveis, sendo mais adequadas metodologias integradas com o SIG, que permitam a consideração do escoamento nessas áreas.

A metodologia utilizada no Cenário 1 pode ainda apresentar melhores resultados no ajuste dos hidrogramas, quando a rede de condutos for representada através de uma forma topológica simplificada, com a certificação de não interação da inundação entre poços de visita. Em casos de eventos de pequena intensidade, que promovam alagamentos não muito significativos, a metodologia também poderá apresentar resultados melhores. Entretanto as informações sobre os níveis máximos de inundação devem ser vislumbradas com cautela, já que não tem nenhuma relação com as características das áreas de inundação. Uma maneira de melhorar a precisão e aumentar a aplicabilidade do método é a determinação das características da área superficial de inundação, e a construção de reservatórios artificiais com características volumétricas semelhantes.

As constatações obtidas fornecem subsídios importantes na utilização das metodologias para simulação de inundação de redes de drenagem, onde muitas vezes o usuário dos modelos pode estar produzindo resultados incoerentes na avaliação do funcionamento do sistema. Assim, deve-se dispor especial atenção na análise das características do sistema de drenagem, observando o histórico de inundações e as possíveis rotas de escoamento ou áreas de armazenamento na superfície, no caso de inundação no sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOONYA-AROONNET, S.; WEESAKUL, S.; MARK, O. Modeling of Urban Flooding in Bangkok. In.: Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Storm Drainage. Global Solutions for urban Storm Drainage. CD-ROM. Portland, 2002.
- CHAN, A.; VASS, A. Modeling a Pressurized Wastewater System, a Case Study. In.: Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Storm Drainage. Global Solutions for urban Storm Drainage. CD-ROM. Portland, 2002.
- DHI. MOUSE PIPE FLOW: Reference Manual. DHI Software 2002, 118p. Disponível em <<http://www.dhisoftware.com>>. Denmark, 2003a.
- DHI. MOUSE Runoff: Reference Manual. DHI Software 2002, 53p. Disponível em <<http://www.dhisoftware.com>>. Denmark, 2003b.
- DJORDJEVIC, S.; PRODANOVIC, D; MAKSIMOVIC, C. An approach to simulation of dual drainage. Water Science and Technology. Volume 39, Issue 9, Pages 95-103. 1999.
- HEERINGEN, K.; VERWEY, A.; MELGER, E. Dutch Approach to High Speed Urban Drainage Modeling with SOBEK. In.: Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Storm Drainage. Global Solutions for urban Storm Drainage. CD-ROM. Portland, 2002.
- MELLER, A. Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria-RS. Santa Maria: UFSM – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2004.
- TOMICIC, B.; MARK, O.; KORNBORG, P. Urban Flooding Modelling Study at Playa de Gandia. 3rd DHI User Conference. Denmark, 1999.
- WISNER, P.E.; KASSEM, A.M. Analysis of Dual Drainage Systems by OTTSWMM. In: Urban Drainage Systems: Proceedings of the First International Seminar. Pitman Advanced Publishing. p.93-108. Southampton, 1982.