

Simulação hidrodinâmica 1D de Inundações em Sistema de Drenagem Urbana

Adalberto Meller, Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

Departamento de Hidráulica e Saneamento – CT – UFSM – Cidade Universitária
97105-900 - Santa Maria, RS – betomeller@uol.com.br

RESUMO

O aumento da frequência das inundações urbanas nas últimas décadas, tem tornado cada vez mais importante a incorporação de ferramentas que auxiliem no processo de tomada de decisão no gerenciamento da drenagem urbana. Neste trabalho é apresentada uma metodologia simplificada para simulação de inundações, aplicada a uma pequena bacia hidrográfica em Santa Maria-RS, utilizando dados observados. O modelo proposto permite a propagação hidrodinâmica 1D do escoamento através da superfície das ruas e da rede de condutos. A interação entre as redes é bi-direcional, realizada através de equações de vertedores. Os resultados das simulações foram satisfatórios, tanto na simulação dos níveis de inundação nas ruas como na representação dos hidrogramas da bacia. A metodologia representa uma alternativa importante na simulação e avaliação de medidas de mitigação das inundações urbanas, podendo economizar, com bons resultados, um grande esforço na programação ou aplicação de metodologias mais complexas.

Palavras-chave: modelagem hidrodinâmica; inundações urbanas; drenagem urbana.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a ocorrência de inundações em áreas urbanas e ribeirinhas tem-se intensificado e tornado cada vez mais frequente entre os municípios brasileiros (Tucci, 2003). Esse cenário deve-se, principalmente, a ineficiência da política de desenvolvimento urbano das cidades, no planejamento da ocupação do solo. A ocupação não planejada resulta em: a) ocupação de áreas ribeirinhas; b) impermeabilização crescente e excessiva; c) prática comum e muitas vezes desnecessária da canalização de rios e córregos (Canholi, 2002). Os resultados quantitativos da combinação desses processos no escoamento pluvial são o aumento dos volumes e vazões de pico, e por consequência, da frequência e magnitude das inundações nas cidades.

Nesse contexto, surge a necessidade de incorporação de ferramentas para planificação de ações preventivas e corretivas da drenagem urbana, de maneira integrada na bacia hidrográfica. Nesse aspecto, a utilização de modelos para simulação da drenagem urbana já comprovou ser imprescindível. Segundo Mark *et al.* (2004), com os avanços atuais da tecnologia da computação, muitas cidades em países desenvolvidos utilizam simulações computacionais para solução de seus problemas locais de inundações. A prática envolve a construção de modelos dos sistemas de drenagem utilizando aplicativos como o MOUSE (Abbott *et al.*, 1982; Lindberg & Jørgensen, 1986), SOBEK-Urban (Heering *et al.*, 2002), InfoWorks CS (Chan &

Vass, 2002) e o SWMM (Huber & Dickinson, 1992). Com base nos resultados das simulações, medidas de mitigação podem ser avaliadas e a solução ótima pode ser implementada.

Os modelos de redes de drenagem pluviais

Os modelos para simulação da drenagem urbana, em geral, incluem dois componentes seqüencialmente conectados: um modelo hidrológico para transformação da precipitação em escoamento superficial e um modelo para propagação do escoamento em redes de condutos e canais. Os modelos hidrológicos descrevem o processo de transformação chuva-vazão através de algoritmos de perdas por armazenamento em depressões, interceptação, perdas por infiltração e de propagação na superfície.

Os modelos de propagação representam o movimento da água na rede de condutos e canais. Normalmente esses modelos utilizam as equações de Saint Venant em sua forma completa, e são chamados hidrodinâmicos. Embora outras formulações mais simples (onda cinemática ou difusão) sejam passíveis de utilização, alguns fenômenos que ocorrem em redes de condutos sob condições críticas, como inversões de fluxo, efeitos de jusante, mudança de regime e escoamento sob pressão, somente podem ser contemplados com a utilização dos modelos hidrodinâmicos (Villanueva, 2003).

Os primeiros modelos hidrodinâmicos de simulação de redes surgiram no final da década de 60. Embora tenham surgido com objetivo de

simulação e verificação do escoamento somente através da rede de condutos, logo foram adaptados para serem utilizados também na simulação de inundações em áreas urbanas. Nesse campo a contribuição dos modelos de drenagem urbana é significativa, fornecendo subsídios para o entendimento das causas e da dinâmica das inundações. Entretanto, mesmo com todo avanço da modelagem, atualmente ainda existem poucos estudos que consideram simultaneamente as condições dos condutos sob pressão na rede simultaneamente com a inundação de grandes áreas da superfície da bacia (Mark *et. al.*, 2004). No panorama brasileiro, pode-se citar o trabalho de Miguez *et al.* (2001).

A simulação de inundações em áreas urbanas

Várias técnicas para simulação de inundações em áreas urbanas têm sido desenvolvidas e utilizadas com bons resultados nas últimas décadas, as mais robustas integrando o SIG a modelos de propagação do escoamento na superfície em 2D (Alam, 2003; Hsu *et al.*, 2000; Schmitt *et al.*, 2004; Phillips *et al.*, 2005). A simulação em duas dimensões na superfície pode ser necessária, especialmente pela complexidade dos caminhos percorridos pelo escoamento no ambiente urbano. No entanto, dependendo das características da superfície da bacia, principalmente do sistema de ruas, metodologias mais simples utilizando modelos hidrodinâmicos 1D podem promover melhores resultados (Iwata *et al.*, 2001).

A técnica padrão da maioria dos modelos hidrodinâmicos de redes de condutos, no caso de ultrapassada a capacidade hidráulica da rede, é utilizar o armazenamento do volume não comportado. Essa metodologia consiste em armazenar a inundação que ocorre no poço de visita, em um reservatório artificial sobre a cota do terreno. O reservatório, por sua vez, 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, retorna então, gradativamente a rede, conforme haja novamente capacidade de escoamento.

Uma das principais limitações dessa abordagem é a de não considerar a interação entre o escoamento nos condutos e através das ruas. Desta forma, o modelo pode erroneamente identificar locais com problemas de inundações além de subestimar a vazão no final no exutório da bacia. Uma discussão sobre as limitações da utilização dessa metodologia pode ser encontrada em Meller

& Paiva (2004).

A propagação do volume excedente ao sistema de drenagem através da superfície vem sendo incorporado à modelagem da drenagem urbana desde a década de 80 e se baseia no conceito denominado aqui “drenagem dupla”. Segundo Djordjevic *et al.* (1999) um modelo de drenagem dupla 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 ou artificiais (ruas), áreas de retenção do escoamento em depressões do terreno ou estruturas de controle artificiais. A figura 1 ilustra o funcionamento de um modelo de drenagem dupla.

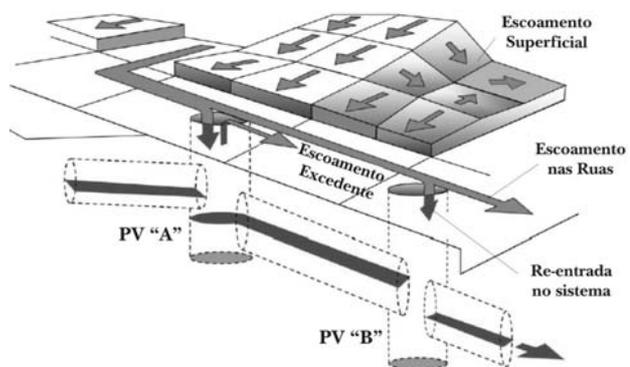


Figura 1 - Componentes do escoamento em um sistema de drenagem dupla (Fonte: Smith, 2006).

De acordo com Smith (2006), as primeiras referências em relação ao conceito de drenagem dupla aparecem no manual de drenagem da cidade de Denver no Colorado (E.U.A.), em 1969. Esse despertar sobre a importância de uma avaliação que integrasse o escoamento tanto na rede de condutos como na superfície da bacia levou, depois dos anos 70, diversos municípios no Canadá a solicitarem a inclusão de uma avaliação nestes moldes nas estratégias de dimensionamento da drenagem (Wisner & Kassen, 1982).

Os primeiros trabalhos a apresentarem modelos de drenagem dupla para computador surgiram no início da década de 80 (Roesner & Shubinski, 1981 e Wisner & Kassen, 1982). Wisner & Kassen (1982), um dos precursores, 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: transformação chuva-vazão (escoamento superficial), propagação do escoamento na rede de drenagem, propagação do escoamento através das

ruas e um modelo específico para considerar a capacidade de engolimento das bocas-de-lobo, de modo a permitir a interação entre os modelos de propagação nas ruas e condutos.

A partir da década de 90, a integração dos modelos de drenagem com o SIG possibilitou simular inundações em extensas áreas urbanas. As bases dessa integração podem ser encontradas no trabalho de Elgy *et al.* (1993), que apresentaram uma metodologia para aquisição de dados espaciais a partir do SIG e para criação automática de arquivos de entrada para modelos de drenagem urbana. Na seqüência, Djordjevic *et al.* (1999) apresentaram um artigo utilizando conceitos semelhantes aos de Wisner & Kassen (1982), porém com uma descrição detalhada da superfície através da utilização de ferramentas de geoprocessamento. Desta forma foi possível considerar o armazenamento do escoamento em depressões no terreno, ruas, reservatórios e áreas de inundação, através da construção do MNT (modelo numérico do terreno), numa conexão bi-direcional entre o sistema de condutos e a superfície do terreno.

Mark *et al.* (2001) avaliaram a aplicabilidade da modelagem do escoamento em 1D na rede de drenagem e superfície, na simulação das inundações que ocorrem na cidade de Dhaka, em Bangladesh. Os resultados das simulações foram avaliados através de mapas de inundação em 3 dimensões, gerados por rotinas de interpolação do modelo hidrodinâmico MOUSE integrado ao SIG. Comparações entre os resultados e os dados disponíveis mostraram que a metodologia empregada na simulação produziu bons resultados, e pode ser aplicada em áreas com problemas de inundação semelhantes.

Vários trabalhos seguiram a linha dos anteriores (Apirumanekul & Mark, 2001; Boonyaroonnet *et al.*, 2002) promovendo inovações ou melhorias na representação do movimento da água na superfície. Apesar desses avanços e da grande aplicabilidade das metodologias, as incertezas com relação ao resultado dos modelos na representação das inundações ainda são grandes. A prática comum, na maioria dos trabalhos, é a avaliação dos resultados com base na simulação de eventos de projeto, em conjunto com alguma informação qualitativa adicional (áreas que alagam com freqüência, por exemplo). Isso se deve em grande parte a escassez de dados de monitoramento em áreas urbanas, o que torna rara a comparação entre variáveis observadas e simuladas por modelos (Villanueva, 2003). Assim, faz-se importante a avaliação desse tipo de modelagem com dados observados.

Outra questão importante se refere a escala da modelagem de inundações urbanas em geral, que tem se restringido a grandes sistemas de drenagem, onde são representados apenas os principais trechos da rede (macro drenagem). Nesse sentido, a proposta do trabalho é a modelagem das inundações de um sistema de drenagem urbana em uma pequena bacia hidrográfica em urbanização em Santa Maria-RS. Na avaliação do modelo do sistema são utilizados dados hidrológicos de 3 postos na bacia, níveis de inundações nas ruas além de informações sobre a rede de condutos e ruas levantadas em campo.

ESTUDO DE CASO: A BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO DA COLINA

Contextualização do problema

A cidade de Santa Maria-RS não é exceção à grande parte das cidades brasileiras. Os problemas de inundações são freqüentes nas áreas urbanas do município, tornando-se crônicos em alguns locais, como na região do Parque Residencial Alto da Colina, que dá nome a bacia do estudo. Na ocorrência de chuvas de maior intensidade a região apresenta pontos de alagamento provocando interrupção do tráfego e se tornando um possível foco de transmissão de doenças à população na região, que possui sistema de drenagem combinado (cloacal/pluvial).

As inundações de maiores proporções ocorrem preponderantemente devido à falta de capacidade hidráulica do trecho da rede que recebe o escoamento da área rural da bacia. Ainda ocorrem inundações em pontos localizados da rede, que se tornou insuficiente ao longo dos anos frente ao aumento das vazões de pico, resultado do processo de expansão urbana na região alta da bacia.

Características da bacia e do sistema de drenagem

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 1,90 km² e abrange três bairros da cidade: Camobi, São José e Pains. O monitoramento é feito através de três postos: dois postos fluviográficos e um posto pluviográfico, com localizações apresentadas na figura 2. Os postos estão equipados com dispositivos eletrônicos com intervalo de discretização temporal de 1 minuto.

A bacia é predominantemente rural, com áreas de urbanização concentradas próximo à foz. O solo na área rural é, em geral, franco-siltoso, ocupado em sua maior parte por áreas de pastagem/campo (31%), agricultura (28%) e mata

nativa/reflorestamento (8%) (Meller, 2004).

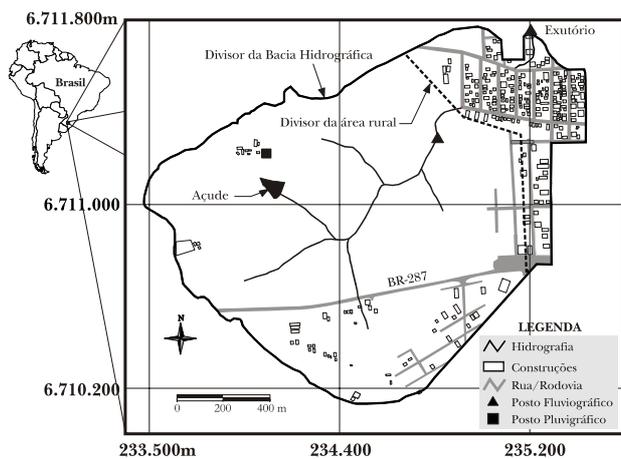


Figura 2 - Mapa da bacia Alto da Colina.

A rede de drenagem pluvial, na área urbana, possui aproximadamente 3510m, com diâmetros mínimo e máximo de 0,20 e 1,20m, respectivamente. Com relação a rede de canais superficiais, fazem parte do sistema de drenagem da bacia 11 ruas, com declividade média de 0,015 m/m, além de um trecho, em canal natural, no exutório da bacia. Estas informações são provenientes de um levantamento topográfico-cadastral da rede em campo, que contou com a abertura dos poços de visita da rede. A figura 3 mostra um mapa com a localização das estruturas do sistema de drenagem na área urbana da bacia.

O MODELO DE DRENAGEM DUPLA DA BACIA

Embora não haja uma divisão física entre os processos hidráulicos e hidrológicos que ocorrem em um sistema de drenagem, na modelagem essa simplificação se faz necessária. Assim, a geração do escoamento e a propagação nos condutos, canais e ruas (no caso de inundações) são realizadas separadamente. Na simulação do sistema foram utilizados três modelos, dois modelos hidrológicos chuva-vazão (modelos A e C2) e um modelo hidrodinâmico para propagação do escoamento na rede, integrantes do aplicativo MOUSE v.2003 (DHI 2003a e 2003b). Os modelos são brevemente descritos a seguir.

- *Modelo A*: utiliza o conceito de isócronas e de histograma tempo-área para propagação superficial do escoamento. Tem como parâmetros o tempo de concentração (t_c) e o histograma tempo-área (sintético ou tradicional), que caracteriza o efeito de translação no escoamento. A separação do escoamento no modelo é controlada por outros dois parâmetros: a) perdas iniciais; b) fator de redução

hidrológica (FR), que representa o coeficiente de escoamento da bacia.



Figura 3 - Sistema de drenagem urbana da bacia.

- *Modelo C2*: na propagação do escoamento na superfície o modelo utiliza dois reservatórios lineares em série, com mesma constante de tempo (K). A determinação da chuva efetiva é feita com base em dois parâmetros: a) perdas iniciais; b) uma taxa de perdas constante ao longo do evento (f_c), que pode ser vista como a capacidade mínima de infiltração do solo. Esse parâmetro foi implementado à parte no aplicativo, como uma simplificação no modelo de infiltração de Horton.

- *Modelo MOUSE HD*: o modelo hidrodinâmico utiliza um esquema implícito de diferenças finitas (6 pontos) para resolução das equações unidimensionais do escoamento (equações de Saint Venant), permitindo a simulação de redes malhadas, efeitos de jusante, inversões de fluxo na rede e perdas de carga nos poços de visita. Para simulação do escoamento supercrítico as equações completas de Saint Venant são reduzidas à onda de difusão, e a simulação do escoamento sob pressão é realizada através do artifício da Fenda de Preissmann. A estabilidade e precisão da solução do esquema numérico no modelo são garantidas pela utilização de um intervalo de tempo variável na simulação. Os parâmetros calibráveis do modelo são o coeficiente de Manning (n) e o coeficiente de perda de carga nos poços de visita (K_m). A descrição detalhada dos modelos que compõem o aplicativo pode ser encontrada em DHI (2003a, 2003b).

O sistema de drenagem no modelo

O modelo de drenagem dupla é montado com base em três elementos do modelo hidrodinâmico: os nós, os vínculos entre os nós e as funções matemáticas, usadas na representação de algumas estruturas hidráulicas singulares (vertedores e orifícios). Os nós representam poços de visita e caixas de ligação na rede de condutos e, esquinas ou pontos de controle (pontos de troca do escoamento entre camadas) nas ruas. Os vínculos podem ser condutos ou canais abertos.

Os hidrogramas de escoamento superficial, determinados através dos modelos chuva-vazão (veja o item a seguir), podem ser adicionados diretamente aos nós da rede de condutos ou das ruas, dependendo da configuração do sistema. Assim as inundações nas ruas podem iniciar pela falta de capacidade da rede de condutos ou das estruturas de captação (bocas-de-lobo).

No caso de inundação no sistema, a troca de água entre as redes é feita sempre entre os nós da rede de drenagem e da rede de ruas, através de equações de vertedores. Essas equações possuem fundamental importância na aplicação do conceito de drenagem dupla, pois possibilitam a integração bidirecional do escoamento nas duas camadas de propagação. Além da integração entre redes, servem ainda para limitar o fluxo entre as redes de acordo com a capacidade das estruturas de captação na entrada ou saída do sistema, no caso de fluxo sob pressão na rede de condutos. A equação (1), geralmente empregada no dimensionamento de bocas-de-lobo em projetos de drenagem urbana, foi utilizada no trabalho.

$$Q = 1,7.L.y^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

onde: Q=capacidade de engolimento ($m^3.s^{-1}$), L=largura da soleira (m) e y=altura de água próximo a abertura (m).

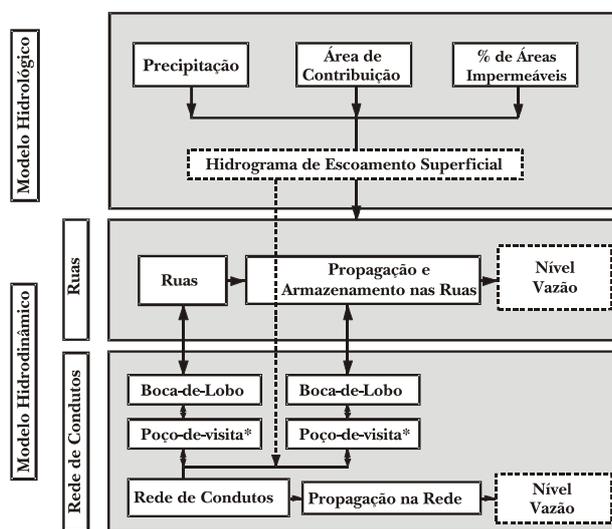
A largura da soleira dos vertedores (L) foi considerada igual a das aberturas de captação das bocas-de-lobo (0,75 m), com cota da crista no nível da rua. No caso de captação em ambos os lados da rua foi adotada uma largura igual à soma das aberturas das bocas-de-lobo (1,5 m). A altura de água (y), da equação (1), é dada com base no cálculo da profundidade do escoamento pelo modelo hidrodinâmico, no caso de inundação do sistema.

As ruas do loteamento, que constituem a rede de canais superficiais, foram representadas na forma de canais abertos, trapezoidais, com seções transversais médias levantadas em campo. É

importante enfatizar que o objetivo da simulação do escoamento através das ruas não é a obtenção de uma descrição detalhada, e sim uma aproximação da magnitude dos níveis, vazões e volumes escoados quando há inundação da rede. A tabela 1 e a figura 4 apresentam, respectivamente, um resumo dos elementos do sistema de drenagem e a interação entre as diferentes camadas no modelo do sistema, no caso de inundações.

Tabela 1 - Resumo dos elementos do sistema de drenagem no modelo.

Sub-bacias de contribuição	48
Pontos de saída da rede	2
Nós da rede de condutos	51
Nós da rede de ruas	38
Vertedores	45
Condutos circulares	53
Canais abertos/Ruas	42



* ou caixa de ligação.

Figura 4 - Integração entre as camadas no caso de inundação na rede (modificado de Mark *et al.*, 2001).

Hidrogramas de aporte à rede de drenagem: Para simulação do processo chuva-vazão, a bacia foi dividida em 48 sub-bacias de contribuição, de acordo com os pontos de entrada do escoamento na rede (bocas-de-lobo). A sub-bacia mais importante refere-se a contribuição da parte rural da bacia, que possui área de 1,60 km². A correta representação do hidrograma dessa contribuição é determinante na simulação do sistema de drenagem, pois a maior parte do volume escoado durante os períodos de precipitação intensa se origina nessa região. As demais sub-bacias apresentam áreas variando entre 0,05 e 3 ha e possuem, em sua maior parte, características urbanas.

Dois modelos hidrológicos chuva-vazão foram

utilizados na simulação dos hidrogramas. A sub-bacia rural foi simulada com o modelo reservatório linear e as sub-bacias restantes, na área urbana, com o histograma tempo-área. A justificativa para utilização de diferentes modelos chuva-vazão são as diferenças no processo de formação do escoamento nas duas regiões. A região rural apresenta hidrogramas com ascensão e recessão lentas e picos suaves e achatados, bem representado pelo modelo do reservatório linear. Nas áreas urbanas, ao contrário, a contribuição é rápida com picos bem definidos.

CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

No processo de calibração, dois procedimentos distintos foram utilizados: um para os eventos de grande intensidade, que provocaram inundações significativas no sistema, e outro para eventos de menor intensidade. Para os eventos de menor intensidade, a calibração foi dividida em duas etapas: 1º) calibração dos hidrogramas observados na sub-bacia rural, com o modelo reservatório linear; 2º) calibração geral da bacia, em um ajuste conjunto entre os modelos histograma tempo-área e hidrodinâmico, uma vez que o hidrograma observado na seção de controle (exutório da bacia) representa a interação dos hidrogramas gerados nas sub-bacias urbanas e rural, propagados na rede.

Para os eventos que provocaram inundações no sistema de drenagem, devido tanto à limitada série de dados no posto da área rural da bacia (desativado em 03/2002) como as incertezas no ramo superior da curva-chave nesse posto, o processo de calibração dos modelos foi conjunto. Dessa forma, o ajuste dos hidrogramas da sub-bacia rural e das sub-bacias urbanas foi realizado indiretamente, com base no hidrograma observado no exutório da bacia. Como informações complementares no ajuste dos modelos, utilizaram-se locais de ocorrência de alagamentos e níveis de inundação observados em algumas ruas. Essa prática, citada por Cunge (1980) *apud* Villanueva & Tucci (2001) como “calibração qualitativa”, consiste em comparar os resultados das simulações com a localização e grandeza aparente dos alagamentos assim como outros fenômenos como condições de escoamento em canais abertos, inundações em poços de visita, marcas de inundação, etc. O procedimento garante, além do bom ajuste do hidrograma na seção de controle, uma melhor representação do escoamento na rede de condutos e na superfície da bacia.

No total foram calibrados 21 eventos para a sub-bacia rural (5 calibrados indiretamente) e 13

eventos para a bacia no exutório, observados no período de 2001 a 2003. Na calibração do parâmetro f_c do modelo reservatório linear, além dos hidrogramas observados foram utilizados como informações de apoio resultados de testes de infiltração na área rural da bacia. A qualidade do ajuste dos hidrogramas foi avaliada através dos erros percentuais nas vazões de pico (EP) e volume escoados (EV) e do coeficiente de correlação (r), dados, respectivamente, pelas equações 2, 3 e 4.

$$EP = \left(\frac{Q_{PC} - Q_{PO}}{Q_{PO}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

$$EV = \left(\frac{\sum_{t=1}^{nt} (Q_C(t)) - \sum_{t=1}^{nt} (Q_O(t))}{\sum_{t=1}^{nt} (Q_O(t))} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$r = \frac{\text{Cov}(Q_O, Q_C)}{\sigma_{Q_O} \cdot \sigma_{Q_C}} \quad (4)$$

onde: Q_{PO} =vazão de pico observada (m^3/s), Q_{PC} =vazão de pico calculada (m^3/s), Q_O =vazões observadas (m^3/s), Q_C =vazões calculadas (m^3/s), $\text{Cov}(Q_O, Q_C)$ =covariância entre as vazões observadas e calculadas, σ_{Q_O} =desvio padrão das vazões observadas e σ_{Q_C} =desvio padrão das vazões calculadas.

O ajuste dos parâmetros foi manual, por tentativa e erro. Esse processo foi auxiliado por uma análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos utilizados, apresentada por Meller (2004).

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DE PROJETO

Para avaliação da situação atual do sistema de drenagem, verificação dos pontos críticos e dos níveis de inundação nas ruas, foram simulados sete hidrogramas de projeto, com tempos de retorno iguais a 2, 5, 10, 15, 25, 50 e 100 anos. Os hidrogramas foram construídos através do Método de Chicago, com tempo de duração igual ao tempo de concentração médio da área urbana da bacia, igual a 30 minutos. Os parâmetros da equação I-D-F e o padrão de adiantamento da chuva (γ), utilizados no referido método, foram obtidos do trabalho de Paiva (1997). Na simulação dos eventos de projeto foram utilizados conjuntos de parâmetros obtidos através do processo de calibração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, a simulação do sistema de drenagem dupla apresentou bons resultados. Com relação aos modelos utilizados, pôde-se observar que

as maiores incertezas introduzidas na simulação se devem aos componentes hidrológicos (modelos chuva-vazão). Os componentes de propagação mostraram-se pouco sensíveis no ajuste dos hidrogramas, assumindo maior importância na simulação dos níveis na rede de condutos. Para o modelo de propagação não foi possível uma análise aprofundada sobre a eficiência na representação do escoamento na rede de condutos, pela indisponibilidade de dados de monitoramento internos à rede.

Na calibração, o ajuste dos hidrogramas na sub-bacia rural apresentou coeficiente de correlação médio de 0,94 e erros médios na vazão de pico e volume escoado de 4,5 e 15,8%, respectivamente. Para os hidrogramas no exutório da bacia (figuras 5 a 9), o coeficiente de correlação médio foi 0,94 e os erros na vazão de pico e volume escoado foram 4,2 e 19,3%, respectivamente. Os melhores conjuntos de parâmetros, obtidos no processo de calibração, são apresentados nas tabelas 2, 3 e 4. Na simulação com o modelo A, se utilizou o histograma tempo-área sintético correspondente a áreas de escoamento retangulares, semelhantes as sub-bacias de contribuição na área urbana da bacia. O processo de calibração na íntegra pode ser encontrado em Meller (2004).

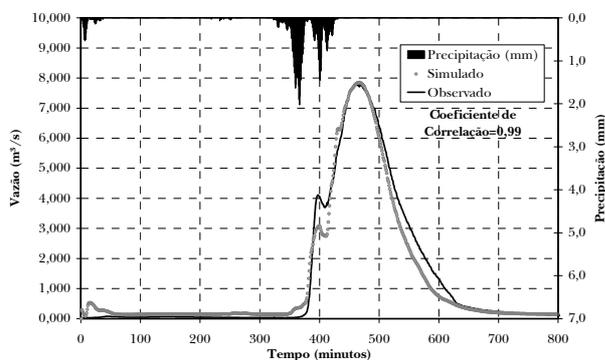


Figura 5 - Calibração no exutório - Data: 19/07/01.

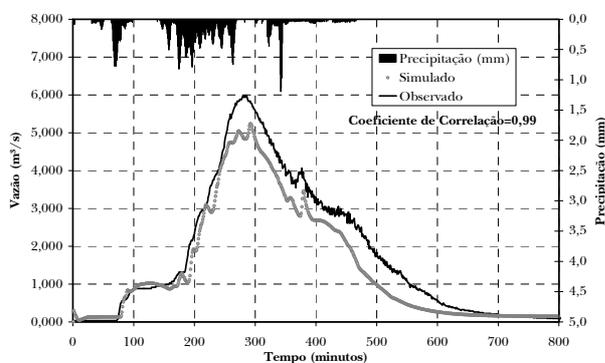


Figura 6 - Calibração no exutório - Data: 19/09/02.

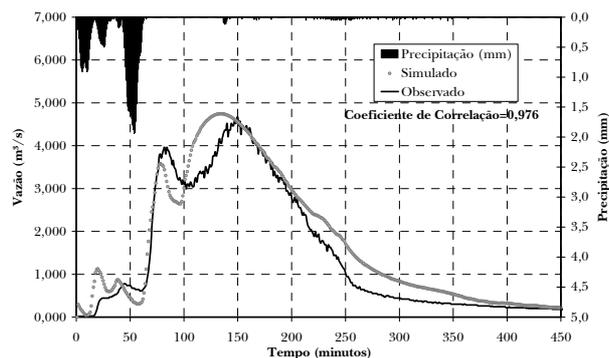


Figura 7 - Calibração no exutório - Data: 23/02/03.

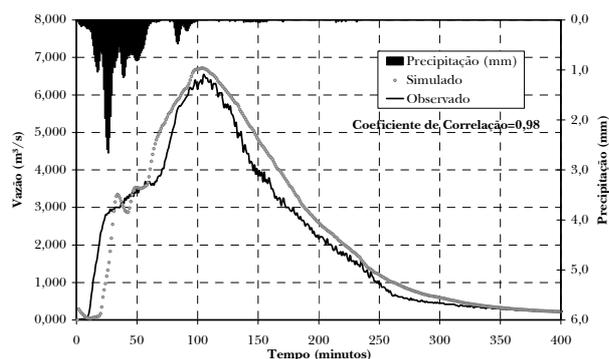


Figura 8 - Calibração no exutório - Data: 10/03/03.

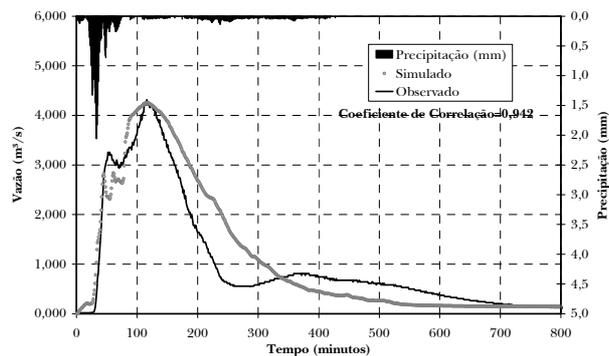


Figura 9 - Calibração no exutório - Data: 16/03/03.

Tabela 2. Parâmetros resultantes da calibração do modelo Histograma Tempo-Área (Modelo A).

Parâmetro	Perdas Iniciais (m)	t_c (min)	FR
Média	0,0071	1	0,66

Tabela 3. Parâmetros resultantes da calibração do modelo Reservatório Linear (Modelo C2).

Parâmetro	Perdas Iniciais (m)	K (min)	f_c (mm/h)
Média	0,0120	136	6,3

Tabela 4. Parâmetros resultantes da calibração do modelo hidrodinâmico (MOUSE HD).

Parâmetro	n^1	n^2	n^3	K_m
Média	0,0147	0,017	0,020	0,50

¹condutos ²ruas ³canais naturais

Na avaliação do modelo na simulação das inundações na bacia os resultados foram satisfatórios. Os níveis máximos de inundação nas ruas, obtidos na calibração dos eventos, foram comparados às marcas históricas de cheia, registros fotográficos e observações dos moradores da região, e apresentaram resultados coerentes, dentro da faixa observada.

As figuras 10 e 11 apresentam os mapas de inundação simplificados, resultantes da calibração dos eventos dos dias 19/09/02 e 10/03/03. Para esses eventos, existem registros do nível de inundação máximo na Rua 8, local onde a rede de condutos recebe a contribuição da área rural da bacia. Como mostra a tabela 5, os erros na predição do nível de inundação foram de -9,1 e -24,9%. Em especial para o evento do dia 19/09/02, o erro de -24,9% na simulação do nível deve-se, provavelmente, a uma subestimativa no hidrograma da sub-bacia rural, já que o hidrograma no exutório apresentou erros no pico e volume escoados de -12,8% e -18,3%, respectivamente. Essa hipótese se fundamenta no fato de que a maior parte do volume escoado durante os eventos de cheia na bacia, são provenientes da sub-bacia rural. Nos outros eventos de cheia calibrados, os erros no pico e no volume escoado foram em média, respectivamente, 1,5% e 10,2%.

Tabela 5 - Comparação nos níveis de inundação observados e simulados na Rua 8.

Evento	Observado (m)	Simulado (m)	Erro (%)
19/09/02	0,85	0,64	24,9
10/03/03	0,88	0,80	9,1

A simulação com as chuvas de projeto mostrou que as inundações começam no sistema com períodos de retorno inferiores a 2 anos, resultantes preponderantemente da ação da onda de cheia da área rural sobre as ruas do parque residencial. Ainda ocorrem alagamentos na Rua 1, resultantes da combinação de condutos com diâmetros de 20 cm no começo do trecho e da característica do trecho de rua que propicia um armazenamento do excesso escoado. A ocorrência de inundação no sistema para períodos de retorno tão pequenos é confirmada pelo histórico de inundações do local. Em cinco anos de monitoramento da bacia (1999-2004), a região experimentou pelo menos uma grande cheia anual. Nas figuras 12 e 13 são apresentados os mapas de inundação simplificados, para os períodos de retorno de 15 e 50 anos.

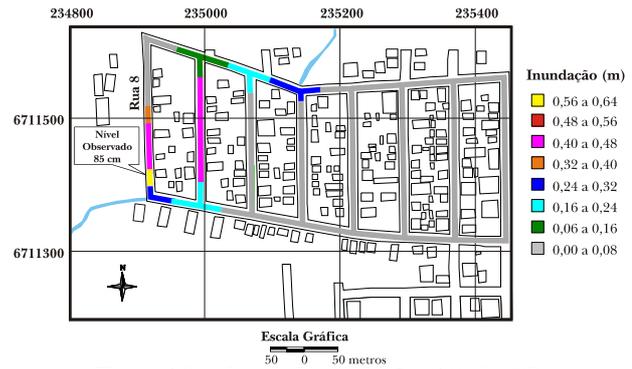


Figura 10 - Mapa de inundação - 19/09/02.

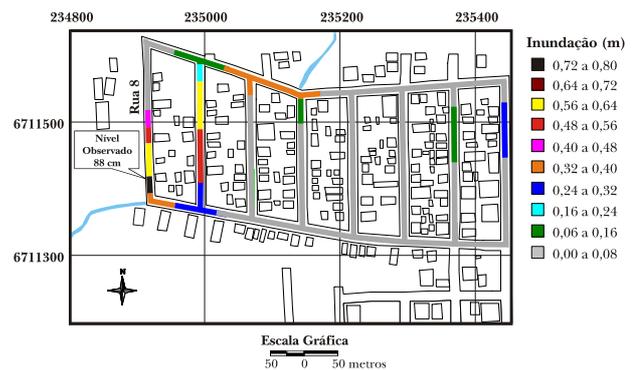


Figura 11 - Mapa de inundação - 10/03/03.

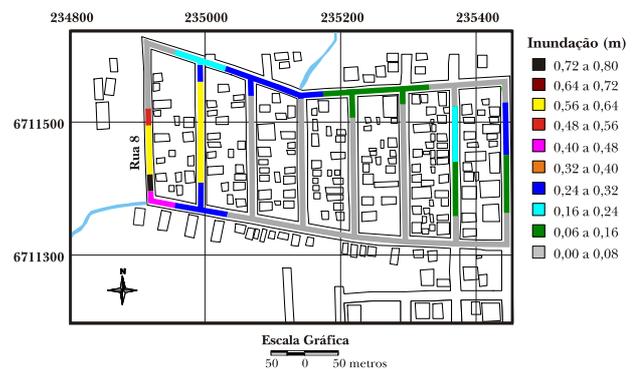


Figura 12 - Mapa de inundação - TR=15 anos.

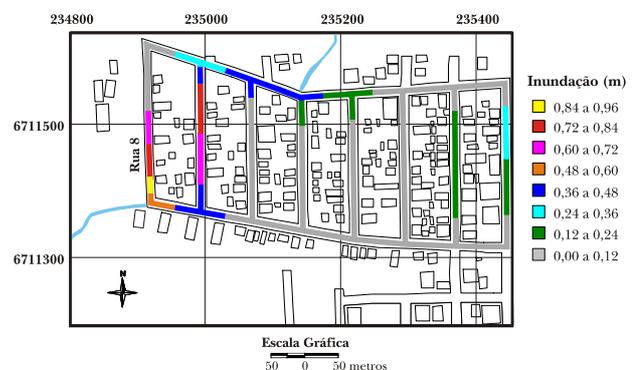


Figura 13 - Mapa de inundação - TR=50 anos.

Outro resultado interessante das simulações com os eventos de projeto diz respeito a capacidade hidráulica máxima da rede de condutos. De acordo com o modelo, a rede de condutos tem capacidade máxima de aproximadamente $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo o restante propagado através das ruas até o exutório da bacia. Para a cheia de 100 anos aproximadamente 43% do volume total do hidrograma no exutório da bacia escoou através das ruas.

Com relação à metodologia utilizada, um dos maiores benefícios está no auxílio à determinação dos pontos críticos da rede. A interação do escoamento através das ruas permite que se avalie qual estrutura ou trecho na rede está realmente sobrecarregado, que desta forma pode ser mais eficientemente redimensionado. Na figura 14 são apresentados os locais (pontos 1 a 6) com maiores problemas de inundação nas simulações dos eventos observados, e a dinâmica das inundações na bacia. Os pontos que apresentaram maiores níveis de inundação foram, em ordem decrescente, 1, 3, 2, 4, 6 e 5. Esses locais foram confirmados através de visitas de campo no ano de 2003, ratificando a boa representação do modelo.

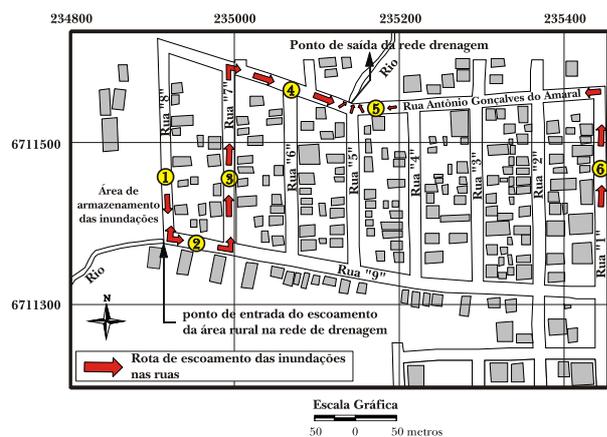


Figura 14 – Principais locais com problemas de inundação na bacia.

Por fim, as incertezas na determinação dos níveis nas ruas assim como nos hidrogramas, podem estar relacionados a uma série de fatores (alguns com maior influência que outros), inerentes ao processo da modelagem, entre os quais se podem citar:

1. deficiência na representação dos processos hidrológicos e da propagação do escoamento pelos modelos;
2. variação espacial da precipitação na bacia, considerada uniformemente distribuída;
3. utilização de uma seção transversal média na rede de ruas da bacia;

4. possibilidade de obstrução dos condutos com materiais sólidos (lixo, vegetação ou sedimentos) durante os eventos de cheia, embora não se tenha observado nas visitas de campo.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a avaliação e simulação das inundações em um pequeno sistema de drenagem no município de Santa Maria-RS, utilizando dados de monitoramento hidrológico e características do sistema de drenagem levantadas em campo. O modelo do sistema de drenagem proposto permite a propagação hidrodinâmica 1D do escoamento em duas camadas, através da superfície das ruas e da rede de condutos. A interação entre as camadas é bi-direcional, através de equações de vertedores.

A metodologia apresentou em geral bons resultados nas simulações, tanto na representação dos níveis de inundação das ruas como nos hidrogramas no exutório da bacia. A calibração dos hidrogramas apresentou coeficientes de correlação superiores a 0,9 e erros na vazão de pico e volume escoados menores que 5 e 20%, respectivamente. Na avaliação dos pontos críticos da rede, o modelo também foi bastante eficiente. Os locais identificados pelo modelo hidrodinâmico como mais críticos, foram averiguados em campo, confirmando a boa representação do modelo. Devido à falta de dispositivos de medição de vazão em seções de controle internas a rede, não foi possível uma avaliação detalhada do escoamento na rede de condutos, que fica como perspectiva para futuros trabalhos.

Durante a pesquisa que deu origem a este artigo, a experiência mostrou que embora as características da rede de drenagem obtidas a partir do projeto sejam suficientes para uma avaliação preliminar, somente um levantamento detalhado em campo pode produzir resultados confiáveis. Da mesma forma, a ausência de dados hidrológicos na bacia poderia levar a resultados sem compromisso com a realidade, resultando em soluções antieconômicas e inefetivas para os problemas de inundação na bacia. Assim, pretende-se enfatizar a relação monitoramento-modelagem, procedimentos que sempre devem caminhar juntos.

Com base nos resultados obtidos, acredita-se que a modelagem hidrodinâmica de inundações 1D integrada com as ruas constitui atualmente uma ferramenta eficiente no planejamento e gerenciamento da drenagem urbana. A metodologia fornece subsídios para o entendimento do fenômeno de inundações além da avaliação de

medidas mitigadoras consistentes e econômicas, não estando sua aplicação limitada a grandes sistemas de drenagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT/CT-HIDRO através do projeto CTHidro/GURH: FINEP03/2002 e ao CNPq (edital Universal 01/2001) pelos recursos financeiros, à CAPES pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor e ao DHI Water & Environment, na figura de Alejandro Lasarte, pela permissão de uso do aplicativo na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M.B.; HAVNO, K.; HOFF-CLAUSSEN, N.E.; KEJ. A. (1982). A modeling system for the design and operation of storm sewer networks. Engineering Applications of computational hydraulics. Editors: ABBOTT, M.B.; CUNGE, J.A. Pitman. v.1, ch.2, p.11-39. London.
- ALAM, J. Md. (2003). Two-dimensional urban flood modeling for real time flood forecasting for Dhaka city, Bangladesh. AIT Thesis n° WM-02-06. Bangkok: Asian Institute of Technology, Thailand.
- APIRUMANEKUL, C.; MARK, O. (2001). Modelling of urban flooding in Dhaka City. 4rd DHI User Conference. Denmark.
- BOONYA-AROONNET, S.; WEESAKUL, S.; MARK, O. (2002). 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. ASCE, Portland.
- CANHOLI, A.P. (2002). O Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê. Disponível em <<http://www.geocities.com/CapitolHill/Senate/6505/drenagem.htm>>. Acessado em 2002.
- CHAN, A.; VASS, A. (2002). Modeling a Pressurized Wastewater System, a Case Study. Ninth International Conference on Urban Storm Drainage (ICUD). CD-ROM. Portland.
- DHI. (2003a). MOUSE PIPE FLOW: Reference Manual. DHI Software 2002, 118p. Denmark.
- DHI. (2003b). MOUSE Runoff: Reference Manual. DHI Software 2002, 53p. Denmark.
- DJORDJEVIC, S.; PRODANOVIC, D.; MAKSIMOVIC, C. (1999). An approach to simulation of dual drainage. Water Science and Technology. Volume 39, Issue 9, Pages 95-103.
- ELGY, J.; MAKSIMOVIC, C.; PRODANOVIC, D. (1993). Matching Standard GIS Packages with Urban Storm Drainage Simulations Software. Sixth International Conference on Urban Storm Drainage. Niagara Falls.
- HEERINGEN, K.; VERWEY, A.; MELGER, E. Dutch Approach to High Speed Urban Drainage Modeling with SOBEK. (2002). In.: Ninth International Conference on Urban Storm Drainage (ICUD). CD-ROM. Portland.
- HSU, M.H.; CHEN, S.H.; CHANG, T.J. (2000). Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. In: Journal of Hydrology, Volume 234, Issues 1-2, Pages 21-37.
- HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E. (1992). Storm Water Management Model, version 4: user's manual. EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS). U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia.
- IWATA, M.; FUJIWARA, N.; MORIKAWA, H.; YOO, A. (2001). 2001. Flood Simulation of Highly Urbanized Areas in Japan Using MOUSE. 4th DHI Software Conference & DHI Software Courses. Helsingør, Denmark.
- LINDBERG, S.; JØRGENSEN, T.W. (1986). Modelling of Urban Storm Sewer Systems. In: Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data. UDM '86. Dubrovnik, Yugoslavia.
- MARK, O.; APIRUMANEKUL, C.; KAMAL, M.; PRAYDAL, P. (2001). Modelling of Urban Flooding in Dhaka City. UDM, Orlando.
- MARK, O.; WEESAKUL, S.; APIRUMANEKUL, C.; BOONYA-AROONNET, S.; DJORDJEVIC, S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. Journal of Hydrology. Volume 299, Issues 3-4, December 2004, Pages 284-299.
- MELLER, A. (2004). Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria-RS. Santa Maria: UFSM – PPGE. Dissertação de Mestrado. Santa Maria. 180 pg. Disponível em <<http://www.ufsm.br/iurh/iurh.htm>>.
- MELLER, A.; PAIVA, E.M.C.D. (2004). Comparação entre Metodologias de Simulação de Inundações em Redes de Drenagem Pluviais Aplicadas a uma Pequena Bacia Hidrográfica em Urbanização. In: XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro-SP.

- MIGUEZ, M.; MASCARENHAS, F.; CAMPOS, R.; D'ALTÉRIO, C. (2001). Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Países de Linha Portuguesa. ABRH: Aracajú/SE.
- PAIVA, J.B.D. (1997). Padrão das precipitações em Santa Maria-RS. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. V.2. p.221-229. Vitória.
- PHILLIPS, B.C.; YU, S., THOMPSON, G.R.; SILVA, N. (2005). 1D and 2D modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW. In: 10th International Conference on Urban Drainage. Copenhagen/Denmark, 21-26 August 2005.
- ROESNER, L.A.; SHUBINSKI, R.P. (1981). Improved Dynamic Flow Routing Model for Storm Drainage Systems. In: Proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage. P.164-173. Edited by Ben Chie Yen. Illinois, USA.
- SMITH, M.B. (2006). Comment on 'Analysis and Modeling of flooding in urban drainage systems'. Journal of Hydrology, Volume 317, Pages 355-363.
- SCHMITT, T.G.; THOMAS, M.; ETTRICH, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. In: Journal of Hydrology, Volume 299, Issues 3-4, Urban Hydrology, Pages 300-311.
- TUCCI, C.E.M. (2003). Inundações Urbanas na América do Sul. Capítulo 6: Brasil. Organizado por Carlos E. M. Tucci e Juan C. Bertoni. Porto Alegre: ABRH.
- VILLANUEVA, A.O.; TUCCI, C.E.M. (2001). Simulação de alternativas de controle em plano diretor de drenagem urbana. Disponível em <<http://www.iph.ufrgs.br/corpodocente/tucci/publicacoes/modealt.PDF>>. Acessado em 2004.
- VILLANUEVA, A.O. (2003). Simulação de redes de macrodrenagem urbana. In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 6. Organizador: Rui Carlos Vieira da Silva. p. 241-308. Porto Alegre: ABRH.
- WISNER, P.E.; KASSEM, A.M. (1982). Analysis of Dual Drainage Systems by OTTSWMM. In: Urban Drainage Systems: Proceedings of the First International Seminar. Pitman Advanced Publishing. p.93-108. Southampton.

ABSTRACT

In this paper a simplified methodology for urban flood simulation applied to a small catchment in Santa Maria-RS using observed data is presented. The proposed model allows 1D hydrodynamic propagation of runoff simultaneously in streets surface and drainage network. The interaction between these layers is bidirectional through weir relations. The results were satisfactory, both in the simulation of flood levels in the streets as in the basin outlet hydrographs. The methodology represents an important alternative in the urban flood simulation and evaluation of drainage alleviation schemes, being able to save a great effort in programming or application more complex methodologies, with good results.