

MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES URBANAS COM DOMÍNIO DINAMICAMENTE VARIÁVEL

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

RESUMO - Nos últimos tempos, devido à impermeabilização do solo ocasionada pela urbanização brasileira não planejada, ocorreu um aumento na frequência e magnitude das inundações. Por isso, vários meios de intervenção vêm sendo propostos, entre eles o uso de modelos 2D para simular tais inundações. Uma das abordagens aplicadas a esses modelos bidimensionais é a redefinição do domínio de simulação de forma dinâmica ao longo do tempo de cálculo. Neste artigo, é apresentado um algoritmo de redefinição automática do domínio numérico, bem como o impacto trazido por ele sobre o custo computacional gasto para a execução do modelo 2D. Esse mecanismo foi aplicado na bacia urbana do Arroio Moinho da Areia, na cidade de Porto Alegre. Além disso, observou-se a dependência da eficiência computacional, introduzida pelo algoritmo proposto, com relação aos parâmetros Largura de Vizinhança (LV) e Número de Passos de tempo para Redimensionamento (NPR). Relações ótimas foram obtidas entre tais parâmetros, mas condicionadas ao estudo de caso. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com redução do tempo de simulação em até 85%, e mostraram o grande potencial apresentado pelo algoritmo, inclusive por sua aplicabilidades a outros modelos 2D conhecidos.

ABSTRACT - In recent times, due to soil impermeabilization caused by unplanned urbanization in Brazil, an increase in the frequency and magnitude of floods has occurred. Therefore, a lot of ways of intervention have been proposed, including the use of 2D models to simulate these floods. One approach for applying these two-dimensional models is the dynamic reshaping of the simulation domain during the calculation time. In this paper, an algorithm for automatic reshaping of the numerical domain is presented, and the impact of its application in terms of saving computational cost for running the 2D model. This algorithm was applied in the urban catchment of Moinho da Areia, located at the city of Porto Alegre. The results showed the dependence of the computational efficiency introduced by the proposed algorithm with the parameters Buffer Threshold Distance (LV) and Number of Time Steps for Reshaping (NPR). An optimal relationship was obtained between these parameters, but conditioned to the study case. The results obtained were satisfactory, with a reduction in simulation time up to 85%, and showed the great potential presented by the algorithm, which seems suitable for being used with other 2D models.

Palavras-Chave – modelagem hidrológica, drenagem urbana, máscara dinâmica.

1) Estudante de graduação em Engenharia Ambiental – Depto de Eng. Civil e Ambiental - CT - UFPB. Campus I, João Pessoa-PB, 58051-900. (83) 3216 7355. Email larissas.serra23@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) 3216 7355. Email marcela.rafaela@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

Uma característica presente no modo de urbanização brasileiro é o aumento da impermeabilização da superfície. A consequência mais grave disso pode ser apontada como a sobrecarga dos sistemas de drenagem de águas pluviais e a ocorrência de inundações urbanas (Tucci, 2002). Prevalece a mentalidade antiquada de escoar as águas de chuva o mais rápido possível, ao invés de buscar soluções de controle na fonte, como mecanismos de infiltração e armazenamento da água no lote (IPH, 2005; Baptista *et al.*, 2011).

Para fins de simulação de cenários de intervenções, planejamento e proposição de medidas de mitigação, modelos matemáticos de diversos tipos são aplicados aos sistemas de drenagem urbana (Tucci, 1995). Uma abordagem relativamente recente consiste no uso de modelos bidimensionais (2D) para a simulação das inundações sobre a superfície urbana (Hsu *et al.*, 2000; Phillips *et al.*, 2005; Leandro *et al.*, 2009). Tais modelos simulam como se propagam pela superfície os volumes de água que excedem a capacidade do sistema de galerias da micro e macrodrenagem. Usualmente, tem sido aplicadas abordagens do tipo onda cinemática ou difusiva, e não modelos hidrodinâmicos 2D, em função do custo computacional, dos objetivos do estudo e da limitação de dados disponíveis.

Entretanto, por dividir a superfície em elementos ao longo de uma malha bidimensional e por necessitar de passos de tempo reduzidos, o custo computacional da aplicação de modelos 2D simplificados (onda cinemática ou difusivo) também pode ser proibitivo em alguns casos. Uma alternativa de redução de custo computacional de modelos hidrológicos é o uso de programação paralela valendo-se de computadores pessoais com vários núcleos de processamento (Neal *et al.*, 2009). Outra abordagem é a redefinição do domínio de simulação de forma dinâmica ao longo do cálculo, conforme a necessidade de incluir ou não cada elemento da malha numérica.

Este artigo apresenta o impacto sobre o custo computacional da simulação de inundações urbanas 2D pela introdução de um mecanismo automático de redefinição do domínio. 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 com domínio estático (Paz *et al.*, 2011; Paz *et al.*, 2012).

MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES

O modelo de inundação 2D utilizado neste trabalho é uma adaptação do módulo 2D integrante do sistema de simulação SIRIPLAN para a modelagem hidrológica de áreas urbanas (Paz *et al.*, 2011). O SIRIPLAN foi inicialmente desenvolvido para a simulação de rios com grandes planícies de inundação (Paz *et al.*, 2011) e o modelo 2D que o compõe segue a abordagem primeiramente proposta por Bates e De Roo (2000).

O modelo de inundação 2D utiliza uma formulação tipo onda cinemática para simular o fluxo de água entre os elementos ortogonalmente vizinhos dentro de uma grade regular quadrada. Esse fluxo é calculado de acordo com as diferenças de elevação e de profundidade de água entre os elementos, com o uso de 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 vazão ao longo da direção x; h é a profundidade da água; h_{fluxo} é a profundidade da água disponível para o escoamento entre dois elementos no tempo t , a qual é determinada como a diferença entre o maior dos níveis d'água dos dois elementos e a maior elevação do fundo; n é o coeficiente de rugosidade de Manning do elemento; Δx e Δy são as dimensões do elemento nas direções x e y, respectivamente.

As trocas de água entre os domínios unidimensional e bidimensional ocorrem através dos poços de visita e bocas-de-lobo da rede de condutos. Enquanto a capacidade do conduto da rede 1D não é excedida, o escoamento ao longo da superfície pode entrar nessa rede, caso contrário, alcançará bocas-de-lobo e poços de visita, promovendo o aporte de água e a inundação da superfície.

Portanto, a entrada de água no domínio 2D ocorre apenas através de elementos da grade regular localizados acima de bocas-de-lobo ou outras estruturas hidráulicas através dos quais há extravasamento da água da rede de condutos 1D. Na versão atual do modelo 2D utilizado nesta pesquisa, não é permitida a saída de fluxo do domínio 2D para a rede 1D.

A cada passo de tempo de cálculo, o balanço entre entradas e saídas da água em cada elemento é usado para atualizar o seu nível de água, através de um esquema numérico explícito no tempo e progressivo no espaço:

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

onde ${}^t Q_y$ é a vazão na direção y entre os elementos, e ${}^t Q_{\text{ex}}$ significa o fluxo de troca entre o elemento 2D e a boca-de-lobo correspondente da rede de condutos 1D.

ALGORITMO DE REDEFINIÇÃO DO DOMÍNIO NUMÉRICO

O algoritmo proposto funciona como uma espécie de máscara dinâmica, que identifica, dentre todos os elementos da região de simulação, quais deles realmente precisam ser considerados para o cálculo, ignorando os demais, ao longo da simulação.

O conjunto de elementos selecionados para serem 'reconhecidos' pelo modelo e entrarem no cálculo constituem o domínio de simulação do modelo. Ao longo da simulação, a máscara é capaz

de redefinir esse domínio, com a intenção de reduzir o tempo computacional gasto para percorrer a matriz (ou grade regular) na qual os elementos estão inseridos e, conseqüentemente, beneficiar o usuário. A variação do domínio ao longo do tempo ou essa espécie de máscara que se molda em uma grade regular estática conforme a necessidade, explica a utilização do termo ‘máscara dinâmica’.

No início da simulação do modelo, farão parte do domínio apenas os elementos diretamente conectados às bocas-de-lobo e os elementos vizinhos a elas. Para atualizar a definição do domínio ao longo da simulação, a máscara dinâmica realiza dois grupos de operações: (1) seleção de elementos da grade regular e (2) ajuste e compatibilidade de matrizes numéricas. Estas operações são realizadas sequencialmente a cada número selecionado de passos de tempo do modelo 2D, dado pelo parâmetro NPR (número de passos de tempo para redimensionamento). Esse parâmetro pode ser entendido como o intervalo de tempo entre duas operações consecutivas de reestruturação ou redimensionamento dos pixels que fazem parte da máscara dinâmica, mas expresso em termos de quantidade de Δt , onde Δt é o passo de tempo de cálculo do modelo 2D. Assim, quanto maior for o valor do parâmetro NPR, maior será o intervalo de tempo entre redefinições de domínio consecutivas (Figura 1).

O primeiro grupo de operações abrange o redimensionamento do próprio domínio, e consiste na seleção de elementos da grade regular para fazerem parte do domínio atualizado, de acordo com três critérios: (i) elementos da grade conectados diretamente à rede de condutos 1D, pois são os primeiros a serem inundados caso ocorra um extravasamento nesse domínio; (ii) elementos da grade que estão efetivamente inundados; e (iii) elementos da grade vizinhos aos elementos selecionados em ambos os critérios anteriores, pois ao longo da inundação são os que apresentam maior probabilidade de apresentar inundação, dentro de certa largura de vizinhança (LV).

O LV é um parâmetro escolhido pelo usuário do modelo e pode ser entendido como uma espécie de distância (em pixels) localizada entre a inundação e o contorno ou limite da máscara. Assim, os elementos selecionados no passo (iii) incluirão a zona que pode ser inundada antes da próxima redefinição de domínio (como uma faixa de segurança). Por isso, o parâmetro LV deve ter um valor grande o suficiente para garantir que a inundação não atinja o limite do domínio do modelo, senão os resultados de simulação serão invalidados. Porém, tal parâmetro não pode ter um valor grande demais, pois um valor muito alto para LV implicaria em um maior tempo computacional gasto para a execução do modelo.

O próximo passo do algoritmo de máscara dinâmica consiste em renumerar os elementos do modelo e fazer a equivalência entre matrizes antigas e atualizadas. Até que o período de simulação seja completado, o modelo realizará vários loops (repetições) para redefinir o domínio numérico, fazer as equivalências entre as matrizes e redimensioná-las.

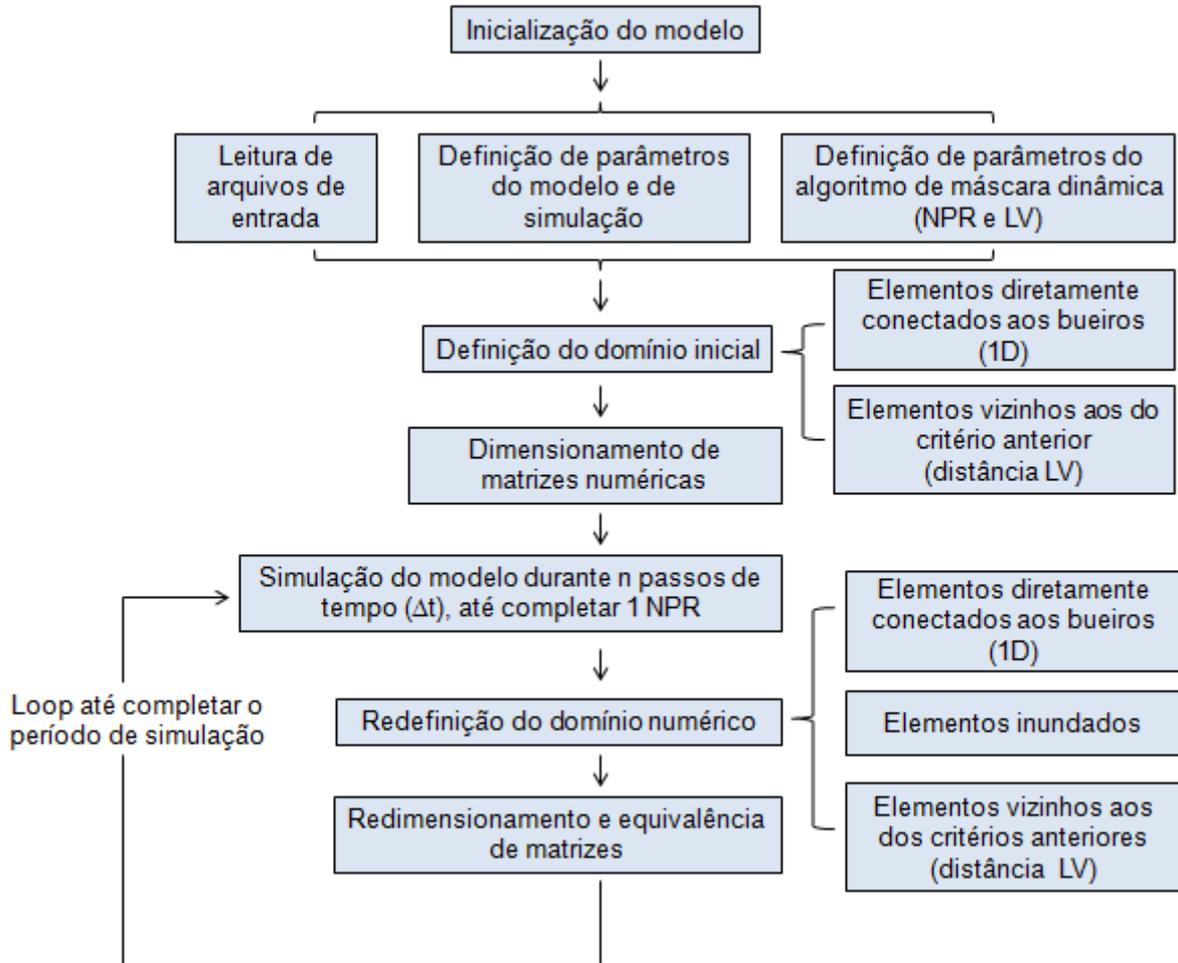


Figura 1 - Organograma representativo da descrição do algoritmo proposto para redefinição do domínio dinamicamente.

Após a execução do modelo, diversos arquivos de máscara dinâmica e de profundidade são gerados e armazenados.

A análise da utilização da máscara dinâmica é feita através da utilização de uma rotina de pós-processamento desenvolvida em linguagem de programação Fortran, a qual tem como arquivos de entrada as séries de arquivos de máscara dinâmica e de profundidade de inundação gerados pelo modelo 2D ao longo do tempo. Tal rotina gera como saída um arquivo em formato ASCII contendo diversas informações relevantes para o estudo, como a quantificação de áreas, volumes, quantidades de pixels, entre outras variáveis, e o tempo necessário para executar a rotina (Figuras 2 e 3), além de arquivos em formato raster georreferenciados com a indicação da extensão da máscara dinâmica em cada instante de tempo. Esses resultados dependem das variáveis LV e NPR determinadas pelo usuário antes de iniciar cada ciclo de cálculos.

Após a leitura dos dois conjuntos de arquivos, o processamento inicial da rotina computacional desenvolvida consiste no cálculo da área e quantidade de pixels totais da máscara, da área e quantidade de pixels comuns entre duas máscaras consecutivas e da área, porcentagem da área e quantidade de pixels não comuns entre duas máscaras consecutivas. Já os arquivos matriciais (formato raster) de profundidade têm suas informações processadas inicialmente para a transformação dos arquivos em matrizes compostas por valores 0 (pixels não inundados) e 1 (pixels inundados). Em seguida, os resultados obtidos são utilizados para o cálculo da área e quantidade de pixels da diferença entre arquivos de máscara e de profundidade e para o cálculo da área e quantidade de pixels comuns entre arquivos de máscara e profundidade. Finalmente, é gerado como saída do algoritmo um arquivo ASCII contendo todas as informações obtidas no decorrer do funcionamento da rotina.

ESTUDO DE CASO

Os testes efetuados para avaliar o desempenho do algoritmo de redimensionamento do domínio foram realizados na bacia urbana do Arroio Moinho da Areia, localizada na cidade de Porto Alegre (Rio Grande do Sul, Brasil) (Figura 4). Essa bacia tem uma área de aproximadamente 11,7 km² e seu curso principal 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).

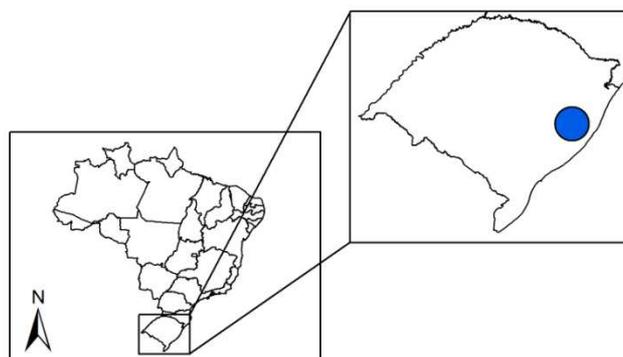


Figura 4 - Localização da bacia urbana do Arroio Moinho da Areia no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (em azul).

A bacia urbana em questão foi anteriormente simulada por um acoplamento off-line de um modelo chuva-vazão a um modelo hidrodinâmico completo 1D para a modelagem da rede de condutos, como descrito em Paz et al. (2011). O modelo hidrológico IPHS1 foi utilizado para a obtenção de hidrogramas para diferentes tempos de recorrência, os quais foram considerados como arquivos de entrada para a modelagem 1D da rede de tubulação com o modelo SWMM. Os hidrogramas de extravasamento em dez pontos da rede de condutos foram obtidos e considerados

como entrada para a execução do modelo 2D. Neste estudo, os hidrogramas extravasados correspondentes ao período de recorrência de 100 anos foram selecionados para testar o algoritmo de redefinição automática do domínio no modelo 2D.

Uma grade numérica com pixels de 5 x 5 m de discretização foi aplicada ao modelo 2D, de acordo com a resolução espacial do modelo digital de elevação (MDE) disponível. Como este MDE não é detalhado o suficiente para representar as ruas, ele foi modificado a partir da imposição do traçado das ruas, ou seja, reduzindo o valor da elevação das células do MDE localizadas ao longo das ruas por um valor arbitrário fixo de 0,40 m. A simulação 2D foi realizada durante um período de tempo de 1 h 40 min, com um passo de tempo de 1 s para evitar instabilidades numéricas.

Para distinguir a maior facilidade de escoamento ao longo das ruas relativamente às demais superfícies, foram adotados coeficientes de Manning distintos: $n = 0,017$ para pixels situados ao longo do traçado das ruas e $n = 0,025$ para os demais.

Várias execuções do modelo 2D foram realizadas, variando os valores dos parâmetros LV e NPR. Em primeiro lugar, considerando valores escolhidos de NPR, o LV foi variado visando encontrar o valor mínimo do LV para o qual a água não atingisse os limites do domínio. Se a água atinge os limites do domínio numérico, significa imposição de escoamento nulo, como uma parede, obstruindo o fluxo e, portanto, alterando e invalidando os resultados da simulação. Depois, o parâmetro LV foi fixado em valores escolhidos e o NPR foi variado para encontrar o seu valor máximo acima do qual a simulação era invalidada devido à água ter alcançado o limite do domínio. Além disso, para fins de comparação, o modelo foi executado considerando um domínio estático, definido de acordo com a topografia da bacia de drenagem (total de 284.235 elementos da grade).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado necessário foi a avaliação de que a introdução da máscara dinâmica não altera os resultados do modelo de inundação. Dessa forma, foram feitas duas simulações iniciais com as mesmas configurações do modelo, com e sem a introdução da máscara. Como esperado, os resultados gerados foram exatamente iguais.

Considerando o coeficiente de Manning adotado e o procedimento da imposição do traçado das ruas, o modelo de inundação foi analisado com o uso do algoritmo para uma chuva de 100 anos por ser a que proporciona as maiores inundações. Assim, foram feitas várias simulações com o modelo 2D para encontrar os pontos críticos de NPR e LV.

Fixando-se os valores de 20, 40, 60, 80, 100 e 120 segundos para o parâmetro NPR, obtiveram-se os valores ótimos do parâmetro LV iguais a 34, 62, 76, 82, 70 e 82 pixels, respectivamente. Esses valores de LV encontrados representam a largura mínima possível de ser utilizada no algoritmo de máscara dinâmica para o valor correspondente de NPR. Ou seja, qualquer

largura abaixo desse mínimo leva a inundação a alcançar a borda da máscara dinâmica, invalidando os resultados da simulação.

Por outro lado, fixando-se os valores de 100, 90, 80, 70 e 60 pixels para o parâmetro LV, obtiveram-se os valores ótimos do parâmetro NPR iguais a 169, 149, 79, 105 e 39 segundos, respectivamente. Esses valores de NPR encontrados representam o tempo máximo em que a máscara pode se redimensionar, considerando os correspondentes valores de LV, para que a água não atinja seus limites e os resultados da simulação sejam invalidados.

O conjunto de valores críticos encontrados para o parâmetro LV e seus respectivos valores de NPR são traçados em azul na Figura 5 e seguem uma curva logarítmica. Esta tendência logarítmica também aparece para o conjunto de valores críticos encontrados para o parâmetro NPR e seus respectivos valores de LV, representados em verde na figura mencionada.

Os resultados mostram que em ambos os processos (fixando-se NPR para encontrar LV mínimo ou fixando-se LV para encontrar NPR máximo) os valores críticos levam a aproximadamente o mesmo par de pontos. Logo, quando um valor crítico NPR é encontrado para um dado valor LV, este valor LV também é, aproximadamente, o valor crítico para NPR.

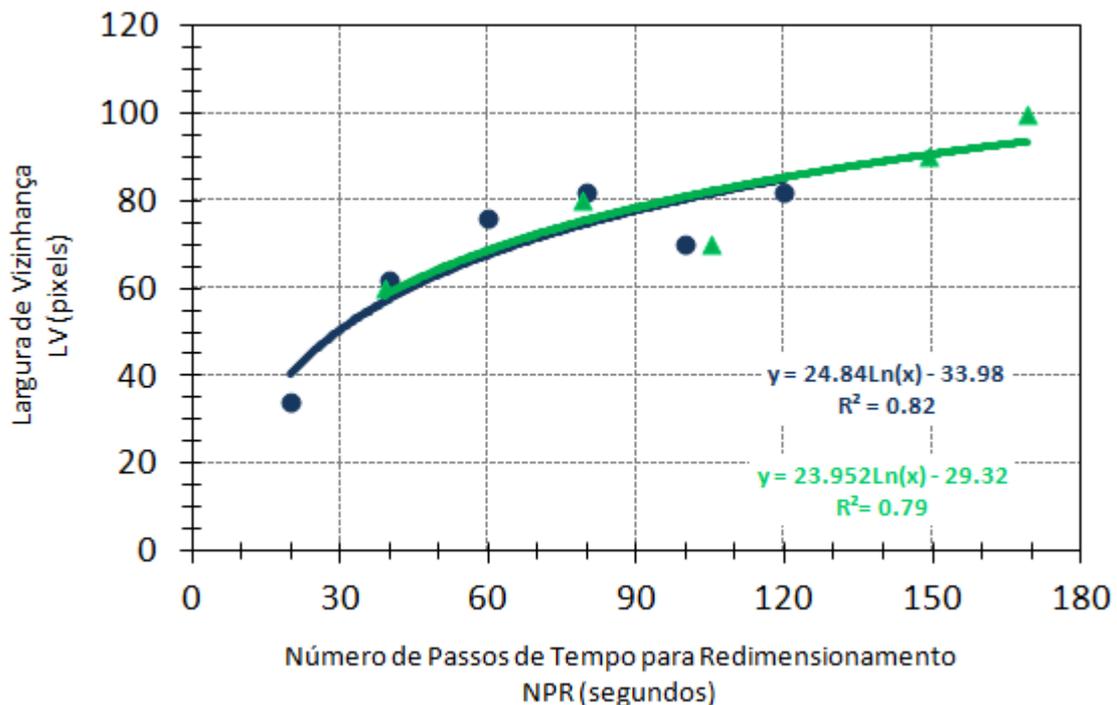


Figura 5 - Valores mínimos encontrados de LV para certos valores escolhidos de NPR (em azul) e valores máximos encontrados de NPR para certos valores escolhidos de LV (em verde); as equações descrevem as curvas logarítmicas para cada conjunto de pontos de acordo com as cores correspondentes.

Na Figura 6 é possível observar a evolução da máscara dinâmica quando foi fixado um passo de tempo de redimensionamento (NPR) de 20 segundos e uma largura de vizinhança (LV) de 34 pixels. A Figura 7 é análoga, sendo referente à simulação com NPR = 20 s e LV = 84 pixels.

No caso da primeira simulação (Figura 6), nos primeiros 20 minutos, quando ainda não há inundação, a máscara tem 11.453 pixels e uma área de 286.325 m². No mapa de 30 minutos, entretanto, observa-se um aumento da área cinza, correspondente à máscara dinâmica. Isso ocorreu devido às primeiras inundações e, nesse momento, a máscara apresenta uma área de 442.025 m² e 17.681 pixels. A partir dos 40 minutos, a área cinza sofre grande ampliação e continua aumentando no decorrer do tempo, como mostra a Tabela 1.

Como esperado, conforme o tempo passa e a inundação aumenta, a máscara dinâmica também aumenta em área e número de pixels. É o que se observa também na Figura 7. Nessa figura, entretanto, nota-se que a máscara dinâmica ocupa uma área bem maior se comparada à Figura 6. Isso ocorre devido ao aumento do valor adotado para o parâmetro LV. Ou seja, se para NPR = 20 segundos a largura de vizinhança mínima é 34 pixels, quanto maior e mais distante desse valor estiver o LV escolhido pelo usuário, maior será a área da máscara dinâmica e maior será o custo computacional gasto para realizar a simulação.

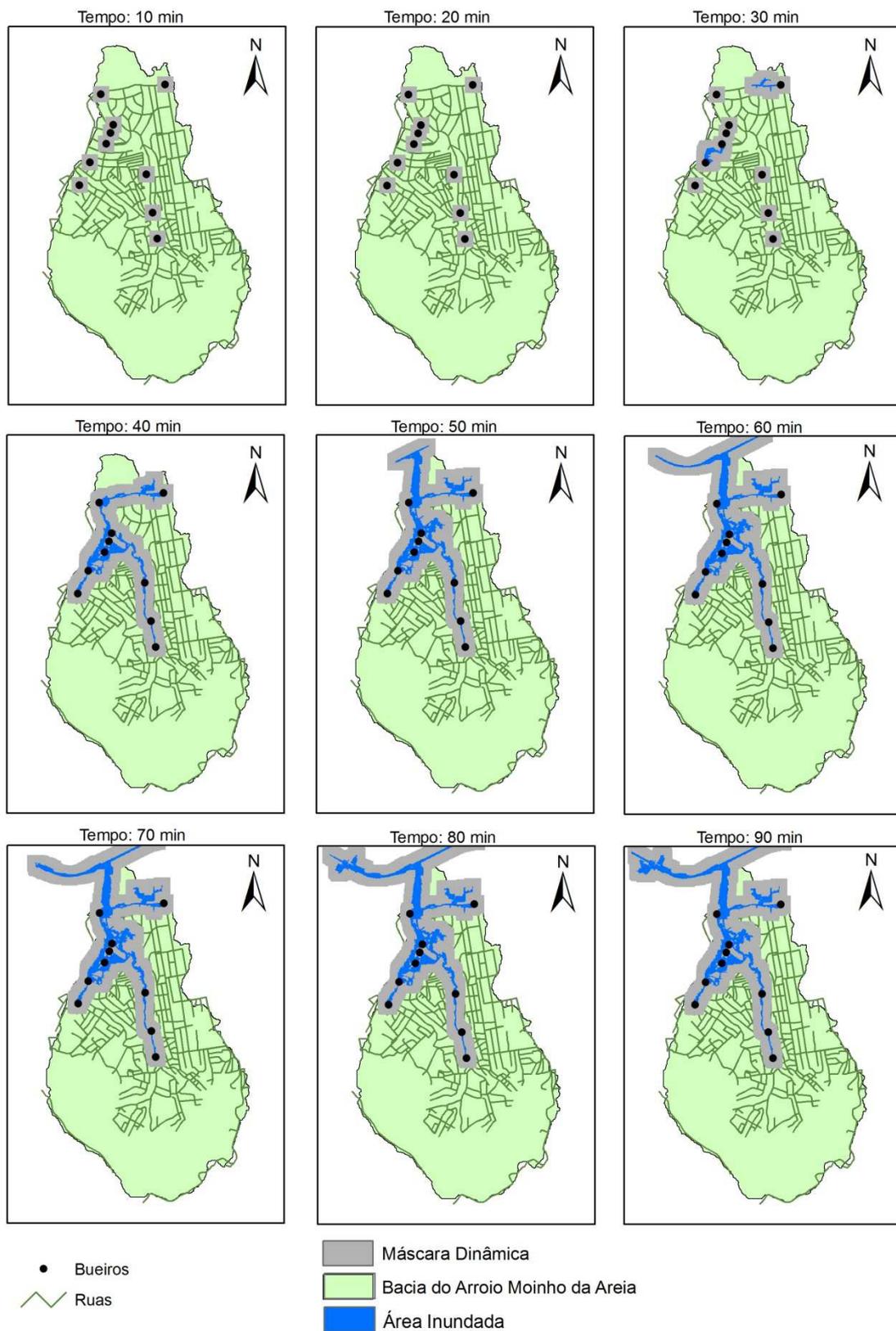


Figura 6 - Evolução da máscara dinâmica ao longo do tempo para LV = 34 pixels e NPR = 20 segundos.

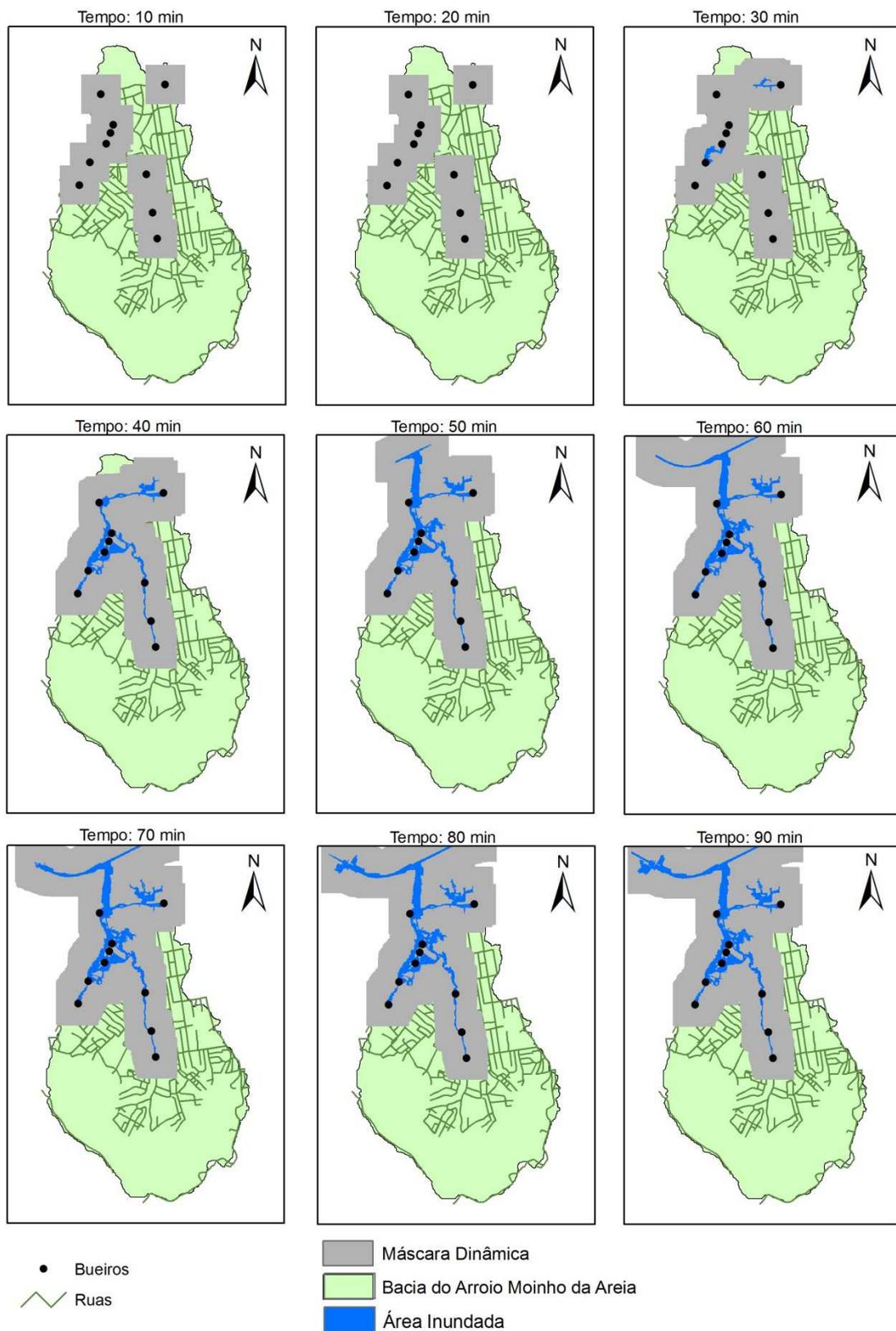


Figura 7 - Evolução da máscara dinâmica ao longo do tempo para LV = 84 pixels e NPR = 20 segundos.

Tabela 1 - Evolução da área da máscara dinâmica ao longo do tempo.

Tempo decorrido	Área total da máscara		Aumento da área em percentual, relativo ao instante anterior
	Em pixels	Em m ²	
10 minutos	11.453	286.325	0%
20 minutos	11.453	286.325	0%
30 minutos	17.681	442.025	54,38%
40 minutos	36.825	920.625	108,27%
50 minutos	48.795	1.219.875	32,51%
60 minutos	57.191	1.429.775	17,21%
70 minutos	58.720	1.468.000	2,67%
80 minutos	62.683	1.567.075	6,75%
90 minutos	63.648	1.591.200	1,54%

Na Figura 8 é possível observar a evolução da área total da máscara dinâmica para NPR = 20 segundos e LV = 34 e 84 pixels e suas respectivas “folgas”, ou seja, o conjunto dos pixels que se incluem no critério (iii) e que, portanto, não estão inundados, mas fazem parte da máscara por segurança.

Até o instante de tempo em torno de 25 minutos, ainda não ocorreu inundação e o domínio é composto unicamente pelos pixels diretamente conectados às bocas-de-lobo (10 pixels, nesse caso) e os pixels da sua vizinhança, conforme o valor de LV. Por isso, as curvas referentes à quantidade de pixels que integram a máscara dinâmica e a faixa de segurança são coincidentes. Ao iniciar a inundação, o número de pixels da máscara dinâmica aumenta, pois mais pixels se tornam inundados e mais pixels são incorporados à faixa de segurança.

A diferença entre as curvas do domínio e da faixa para uma simulação qualquer corresponde à quantidade de pixels inundados (curva preta), em cada instante de tempo. Ou seja, tal diferença independe dos parâmetros LV e NPR. Assim, a distância entre as duas curvas em tons verdes é igual à distância entre as duas curvas em tons azuis.

Toda a quantidade de pixels além daqueles inundados que estiverem fazendo parte do domínio representa um custo sobressalente do processamento de cálculo. Quanto mais pixels estiverem nesse critério, maior será o custo excedente. Portanto, por apresentar uma menor quantidade de pixels sobressalentes, a simulação com LV = 34 pixels é bem mais eficiente computacionalmente do que a com LV = 84 pixels. A possibilidade de diminuição de LV, contudo, é condicionada ao valor de NPR, como já discutido a partir dos valores da Figura 5.

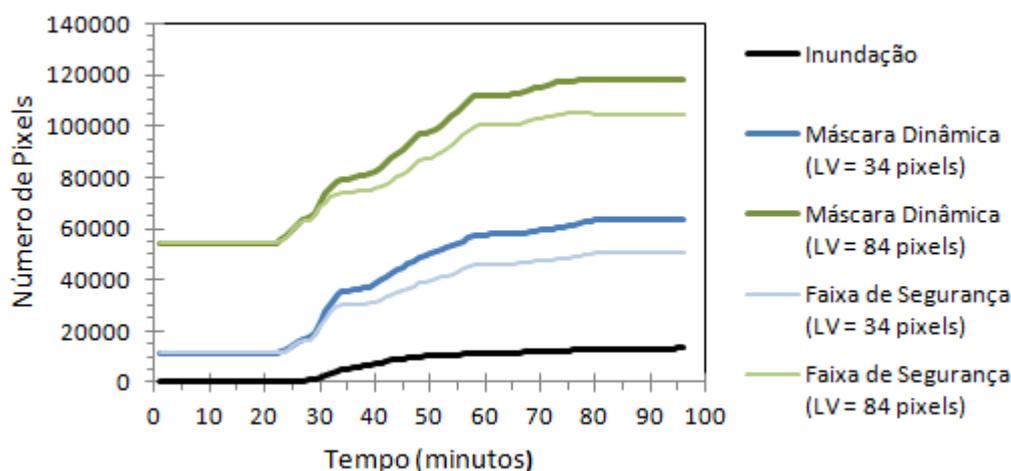


Figura 8 - Evolução das áreas da máscara dinâmica e suas respectivas “folgas” para NPR = 20 segundos e LV = 34 pixels (em azul) e LV = 84 pixels (em verde). A inundação ocorrida para a chuva de 100 anos está representada em preto.

Quanto ao desempenho computacional, utilizando um processador Intel de 2 GHz Core i7 com 4GB de RAM, o modelo 2D levou 4,00 h para ser executado quando o algoritmo de redimensionamento do domínio não foi utilizado. Com a utilização desse mecanismo, o tempo de execução variou entre 0,59 e 2,15 h, de acordo com os valores selecionados para os parâmetros NPR e LV. Assim, o tempo gasto para execução do modelo com a introdução do algoritmo sofreu uma redução de até 85% (Tabela 2).

Tabela 2- Tempos de execução e desempenho do modelo 2D

Configuração da execução do modelo 2D			Tempo Total de Execução (h)	Desempenho relativo à execução sem o redimensionamento do domínio	
Redimensionamento do Domínio	Passo de Tempo de Redimensionamento (s)	Largura de Vizinhança (pixels)		Economia de Tempo (h)	Economia de Tempo (%)
Não	-	-	4,00	-	-
Sim	20	34	0,59	3,41	85%
Sim	40	62	0,97	3,02	76%
Sim	60	76	1,79	2,21	55%
Sim	80	82	0,90	3,10	78%
Sim	100	70	2,15	1,84	46%
Sim	120	82	0,96	3,03	76%

CONCLUSÕES

Quando se trata da redução do custo computacional, o algoritmo de máscara dinâmica proposto neste trabalho mostrou-se ser de grande valia e um grande aliado do usuário, pois permite que ele gere mais resultados em um menor intervalo de tempo, agilizando todo o processo e sem alterar os resultados finais. Afinal, uma das utilidades da modelagem é a possibilidade de geração de resultados para cenários diversos, com alta velocidade de resposta.

Entretanto, a redução de tempo computacional de execução do modelo 2D apresentada neste trabalho é referente ao estudo de caso e condições adotadas. Alterando-se, por exemplo, o tempo de retorno dos eventos chuvosos, alteram-se os hidrogramas extravasados utilizados para simular as inundações 2D e, com isso, a máscara dinâmica proporcionará uma eficiência computacional diferente da obtida e que precisará ser observada.

No mesmo sentido, as relações consideradas ótimas entre os parâmetros do algoritmo de máscara dinâmica deverão ser investigadas quando aplicadas a outras bacias ou outras condições de simulação. A continuação desta pesquisa visará a realização de uma maior quantidade de simulações a fim de obter relações entre os parâmetros e a redução de tempo computacional que possam ser generalizadas para outras condições de simulação e, posteriormente, ter indicações para uso do algoritmo em outras bacias. Cabe ressaltar que, na medida em que o algoritmo da máscara dinâmica é simples e fácil de ser implementado, pode ser adaptado para a maioria dos modelos 2D relatados na literatura.

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 Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de PIBIC às duas primeiras autoras.

BIBLIOGRAFIA

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. (2011). *“Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana”*. ABRH, 318 p. 2ª ed.

BATES, P.D.; DE ROO, A.P. (2000). *“A simple raster-based model for flood inundation simulation”*. Journal of Hydrology, 236, pp. 54-77.

HSU, M.H.; CHEN, S.H.; CHANG, T.J. (2000). *“Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system”*. Journal of Hydrology 234, pp. 21-37.

- IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (2005). *Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre – Manual de Drenagem Urbana*, Porto Alegre: IPH/UFRGS, 223 p.
- LEANDRO, J.; CHEN, A.; DJORDJEVIC, S.; SAVIC, D. (2009). “A comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled hydraulic models (sewer/surface) for urban flood simulation”. *Journal of Hydraulic Engineering* 135(6), pp. 495-504.
- NEAL, J.; FEWTRELL, T.; TRIGG, M. (2009). “Parallelisation of storage cell flood models using OpenMP”. *Environmental Modeling and Software* 24: 872–877.
- OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A. (2011). “Relação entre a Suscetibilidade a Inundações e a Falta de Capacidade nos Conduitos da Sub-bacia do Arroio da Areia, em Porto Alegre/RS”. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*: Volume 16 n.1 Jan/Mar 2011, pp. 05-15.
- 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* 25, 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, Março 2012.
- PHILLIPS, B.C.; YU, S.; THOMPSON, G.R.; SILVA, N. (2005). “1D and 2D modeling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW” in 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen (Denmark), Agosto 2005, pp. 21-26.
- PORTO ALEGRE (2002). Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. *Plano Diretor de Drenagem Urbana: Bacia do Arroio Areia*. v. 4. Porto Alegre: UFRGS/IPH, 2002.
- TUCCI, C.E.M. (2002). “Gerenciamento da drenagem urbana”. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7(1), pp. 5-27.
- TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (1995). “Drenagem Urbana”. *Coleção ABRH de Recursos Hídricos*, Porto Alegre: Editora da UFRGS; vol. 5, 428 p.