

Comparação de Metodologias na Definição de Fluxos Acumulados a Partir de Modelos Digitais de Elevação do Terreno Aplicado a Suscetibilidade de Inundações

Isabel Cristina Moraes*, Fabiano Tomazini da Conceição*, Cenira Maria Lupinacci da Cunha*,
Rodrigo Braga Moruzzi*

bel.moraes.geo@gmail.com ; ftomazini@rc.unesp.br; cenira@rc.unesp.br; rmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 30/04/13 - revisado: 31/07/13 - aceito: 26/11/13

RESUMO

Estudos que envolvem a avaliação de riscos a inundações são de extrema importância para o planejamento da ocupação dos espaços urbanos. Todavia, essa avaliação nem sempre é factível devido às análises complexas envolvidas, as quais são fundamentadas por modelos de base física, que devem traduzir as especificidades hidrogeomorfológicas e considerar a heterogeneidade espacial das bacias. No entanto, a ausência de dados primários e de tempo disponível para concepção/aplicação dos modelos compromete muitas vezes a realização de tais modelagens complexas. Assim, o emprego de geotecnologias e de banco de dados cartográficos para relacionar as características topográficas e o sistema de drenagem de uma área pode auxiliar na identificação de áreas nas quais a concentração do escoamento superficial representa potencialidade para a ocorrência de inundações. Neste sentido, o presente estudo objetivou avaliar os fluxos acumulados a partir do uso de Modelos Digitais de Elevação – MDE e ferramentas de geoprocessamento, tendo em vista a identificação de áreas suscetíveis à inundação para fins de gestão territorial. A partir de MDE de diferentes resoluções espaciais foram empregadas metodologias para a avaliação de algoritmos relacionados à direção e acumulação dos fluxos. A análise espacial da superfície de acumulação de fluxo apresentou resultados condizentes com os aspectos hidrogeomorfológicos e com os resultados obtidos por meio do modelo hidrológico e hidráulico na bacia hidrográfica do Córrego da Servidão (SP), constituindo em instrumento simples e viável para identificação de áreas suscetíveis a inundação.

Palavras-chave: MDE; inundações urbanas; instrumentos de planejamento;

INTRODUÇÃO

A cidade é uma das formas mais evidentes da interferência do homem sobre o ambiente natural, e seu crescimento desordenado pode desencadear diversos impactos ambientais e sociais. O aumento de área impermeabilizada, a ocupação das planícies de inundação e a retificação da drenagem e das ruas contribuem para aumentar o número de casos de inundações. Atualmente, as cidades médias apresentam grande crescimento populacional e reproduzem os problemas das grandes metrópoles. Neste sentido, instrumentos de planejamento eficientes e ágeis tornam-se um desafio quando comparados à rapidez com que se estabelece a malha urbana e a supressão dos corpos d'água.

Tendo em vista a complexidade na determinação de cenários a partir de modelos hidráulicos/hidrológicos, o uso de ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) aliados a algoritmos de processamento automático tem permitido preparar diversos planos de informação para estudos hidrológicos em grandes áreas, com rapidez e baixos custos (BUARQUE et al., 2009).

Na década de 1950, para tratar problemas de ordem tecnológica, científica e militar, o trabalho pioneiro de Miller e Laflamme (1958) elaborou modelos digitais de terreno – MDT. Tais modelos são estruturados por meio de linguagem matemática, representado na forma abstrata dos algoritmos. Apesar de muitos trabalhos no Brasil considerarem os MDT e os modelos digitais de elevação – MDE como semelhantes, diversos autores denominam este último como um MDT específico no qual a altitude é a variável de distribuição espacial contínua (FELICÍSIMO, 1994).

*Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento – DEPLAN/UNESP

A partir de dados topográficos, onde se tem como principais elementos a drenagem, curvas de nível e pontos cotados, empregam-se ferramentas de geoprocessamento em que a interpolação de valores altimétricos passa a constituir uma superfície contínua que determina o Modelo Digital de Elevação do Terreno – MDE. Este MDE é representado comumente por uma matriz (formato *raster*) em que, para cada unidade elementar (denominada célula ou *pixel*) é atribuído um valor de elevação (BURROUGH & MCDONNELL, 1998).

A geração de MDE é a primeira etapa de análise topográfica para a extração de informações de interesse hidrológico. A questão da resolução espacial está diretamente relacionada à questão da escala, e tal entendimento é fundamental para a predição de processos hidrológicos. Conforme Bian (1997), Hengl (2006) e Wu et al. (2008), de acordo com a escala, as variáveis ambientais derivadas de MDE perdem detalhamento e ocorrem nuances na paisagem. Na medida em que MDE são estabelecidos com resoluções mais grosseiras, apesar de não se ter conhecimento das alterações quanto à elevação, constatou-se uma tendência à diminuição da declividade e aumento da área de contribuição (CATEN et al., 2012). Valeriano (2003) indica que tais distorções são verificadas em resoluções espaciais inferiores a 40 m, o que sugere resoluções espaciais superiores, principalmente quando se trata de bacias hidrográficas de pequeno porte e escalas inferiores a 1:10.000.

A área de drenagem a montante de cada célula, as características de declividade e forma da vertente são parâmetros embutidos em um MDE e permitem definir direções de escoamento. A implementação de algoritmos e os valores de cada célula de direção de fluxo fundamentam a determinação de acumulação do mesmo. Fontes (2009) acrescenta que o uso de algoritmos os quais se utilizam da matriz do terreno de interesse (MDE) permite o cálculo da área de contribuição de drenagem (em m² ou km²) de cada célula da matriz, e, portanto, a determinação de um mapa de tendência de acumulação dos fluxos.

O uso de MDE aplicado a estudos hidrológicos envolve diversas variáveis: as características geográficas do terreno, a capacidade computacional, a resolução espacial e a disponibilidade de dados. Neste sentido, faz-se necessária uma análise dos diferentes algoritmos para a obtenção de resultados satisfatórios para a situação de interesse. Uma das questões que motivam a definição de acumulação dos fluxos é a necessidade de procedimentos que compreendam elementos artificiais do terreno como

parâmetro consistente para abordagem ao planejamento.

Este artigo apresenta a comparação de diferentes resoluções espaciais para a geração do MDE, e o desempenho de diferentes algoritmos para a melhor representação espacial dos fluxos acumulados. Os resultados obtidos apoiados pela modelagem hidráulica e hidrológica de uma bacia hidrográfica urbanizada corroboram para a avaliação da distribuição espacial do escoamento superficial direto a fim de identificar áreas susceptíveis a alagamentos/inundação.

METODOLOGIAS PARA A DEFINIÇÃO DO ESCOAMENTO

A necessidade de resposta em diferentes pontos da bacia, a heterogeneidade dos processos físicos, a disponibilidade de informações sobre a superfície terrestre e o avanço da informática são variáveis essenciais na identificação de áreas propensas a riscos de alagamentos. Como seriam identificados pontos de inundação em caso de concentração da precipitação distante de seu exutório? (COLLISCHONN, 2001).

Contornam-se problemas como este pelo uso de modelo de base física que comportam as especificidades hidrogeomorfológicas e consideram a heterogeneidade espacial das bacias. No entanto, na ausência de dados e de tempo hábil para a realização de procedimentos mais sofisticados, como é o caso de modelagens mais complexas, considera-se como uma opção a elaboração de respostas a partir de processos desenvolvidos com auxílio de algoritmos, ambiente de SIGs, base de dados consistente e MDE.

Os primeiros métodos para definir direções de escoamento a partir de um MDE foram descritos na década de 1990, por O'Callaghan e Mark (1984) e Jenson e Domingue (1988). Posteriormente, autores incluíam a possibilidade de definir a direção do escoamento a partir de múltiplas direções, onde se destacam os trabalhos de Quinn et al. (1991) e Tarboton (1997).

Muitas metodologias se encarregam de definir a direção do escoamento com base em MDE. A maior parte destes procedimentos define para cada elemento da matriz um valor atribuído ao fluxo que indica para qual das 8 células adjacentes o fluxo é

direcionado. Enquanto este algoritmo determina uma direção de fluxo única, alguns permitem a designação de mais de uma célula para direcionar o fluxo, ou seja, direções múltiplas de fluxo.

Em considerações feitas por Jenson & Domingue (1988), a direção dos fluxos era tradicionalmente definida pela relação direta com as características de declividade do terreno, sem uso de parâmetros relativos às áreas de vizinhança. Tais limitações se superam na medida em que os MDE passam a utilizar técnicas de interpolação considerando as características das áreas vizinhas. Porém, conforme salientou Douglas (1986 apud JENSON & DOMINGUE, 1988), além da constatação por diversos pesquisadores, na obtenção da direção do fluxo, em que se consideram as células do entorno para a determinação do valor da célula principal, verificou-se que a existência de uma célula com valores altimétricos inferiores aos das células adjacentes formam depressões, que se comportam como elemento de interrupção do fluxo. Assim, as depressões devem sofrer processos de preenchimento, ou seja, às depressões são atribuídos valores semelhantes ao menor valor das células do entorno. Esta etapa deve ser anterior à definição de direção dos fluxos.

Para o uso de diferentes metodologias têm-se os procedimentos de preenchimento e correção das depressões (Figura 1), conforme Schauble (2004):

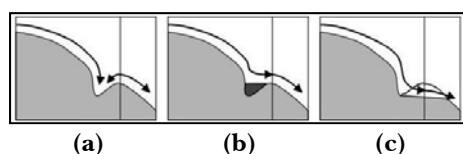


Figura 1 - (a) As áreas deprimidas interrompem o fluxo de água e mascaram o cálculo hidrológico; (b) o MDE deve sofrer preenchimento das depressões com a ferramenta *Filling Sinks* para o D8; (c) o MDE deve sofrer atenuação dos obstáculos à jusante com a ferramenta *DEM Correction* para o MDD8 (SCHÄUBLE, 2004).

Algoritmo de direção simples de fluxo (D8)

O algoritmo que melhor representa a determinação do fluxo a partir de uma única direção é o de Jenson & Domingue (1988, p.1594). Estes autores descrevem que a direção de fluxo de uma dada célula é definida pela direção em que a água flui para fora desta célula, o que corresponde a orienta-

ção de uma das 8 células adjacentes à célula principal. Apresentam-se 8 direções possíveis (eight-direction) denominando o algoritmo D8 (Figura 2).

Este princípio já havia sido aplicado por O'Callaghan e Mark (1984). No entanto, apenas posteriormente o algoritmo passou a estabelecer 4 condições: 1. Quando a célula principal apresenta valor inferior ao das 8 células adjacentes, a direção de fluxo é indefinida, necessitando procedimentos de preenchimento; 2. Em que a ponderação da distância de uma célula em relação a principal é superior as demais, atribui-se o fluxo a esta célula; 3. Quando duas ou mais células assumem distâncias ponderadas iguais, a célula principal escolhe arbitrariamente a direção de fluxo; 4. Quando as 8 células apresentam igual ou maior elevação que a célula central, automaticamente são realizadas operações iterativas, para todas as direções. Cada interação flui para um vizinho caso este já tenha uma direção de fluxo definida que não seja a própria célula central.

64	128	1
32	X	2
16	8	4

Figura 2 - Esquema referente aos valores das células adjacentes, sendo oito as direções possíveis para a célula principal X.

O D8 é exemplificado a partir da Figura 3, onde os valores de cada *pixel* de um *raster* direcionam o fluxo para as células vizinhas de menor elevação, simulando o comportamento natural do escoamento.

A ampla divulgação deste algoritmo leva Tarboton (1997) a ressaltar alguns pontos relevantes da utilização desta técnica. Este faz uso de uma grade simples e eficiente baseada na estrutura em matriz, minimiza a dispersão do fluxo e é capaz de operacionalizar dados complexos, tornando-se uma ferramenta considerada robusta, além de ser favorecido pelos procedimentos de preencher depressões e inclui-las nas áreas planas. Algumas desvantagens pontuam a tendência de direcionar fluxos em determinadas orientações decorrente das apenas 8 probabilidades (orientação de 45°) e a precisão para a direção dos fluxos de modo mais grosseiro que em relação a outros algoritmos.

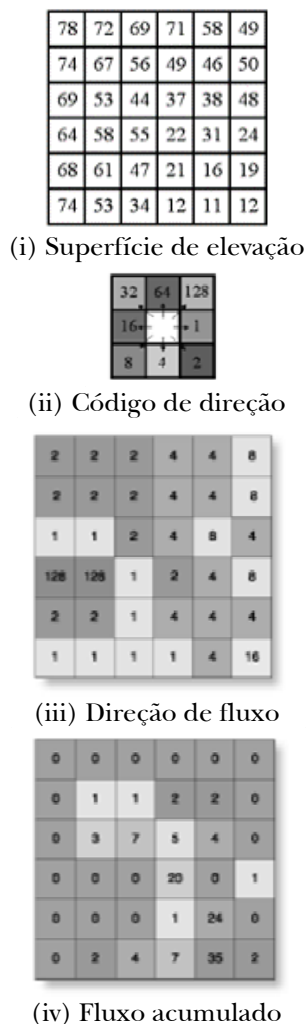


Figura 3 - Etapas para a obtenção do fluxo acumulado (iv) a partir do D8: (i) Superfície de elevação, (ii) Código de direção e (iii) Direção de fluxo
(Fonte: ESRI® - ArcGis 10).

Algoritmo de direção múltipla de fluxo (MD)

O algoritmo de fluxo que compreende múltiplas direções (MD) foi abordado em trabalhos realizados por Quinn et al. (1991) e Freemann (1991), decorrente da tentativa de superar as limitações do algoritmo D8. A obtenção do fluxo a partir de múltiplas direções se dá pela determinação da distribuição da captação por meio do índice de acumulação de fluxo (In), conforme a Equação 1.

$$In = \ln(\alpha / \tan \beta) \quad (1)$$

Em que: a é a área de captação específica (L^2/L) obtida a partir da somatória da área de contribuição de montante, L é a unidade genérica de comprimento, e $\tan \beta$ é a inclinação da rampa (L/L). O índice topográfico In refere-se a tendência da água se acumular em a , sendo $\tan \beta$ o termo que considera as forças gravitacionais, como um gradiente hidráulico aproximado. Este cálculo é necessário para a análise das vias de fluxo e é responsável por determinar a direção de fluxo. Deve ser considerado também um ângulo de inclinação local, ponderado a partir dos n valores dos ângulos de cada *grid*, a partir da soma dos comprimentos ortogonais (QUINN et al., 1991).

Este algoritmo permite que a área de afluência acumulada de qualquer célula seja distribuída entre todos os sentidos de vertente, com orientações cardiais e diagonais, sendo capaz de contribuir para jusante em até oito direções de fluxo. Cada direção da curva descendente também é feita proporcional ao gradiente de cada percurso de escoamento a jusante, combinado com o comprimento da rampa e a área drenada à montante (QUINN et al., 1991). Nesse artigo foram realizadas algumas simulações para vertentes hipotéticas a partir de dados parametrizados de área e do valor de In , visando identificar a sensibilidade desse índice nas três conformações, quais sejam: vertente côncava; vertente convexa e vertente retilínea.

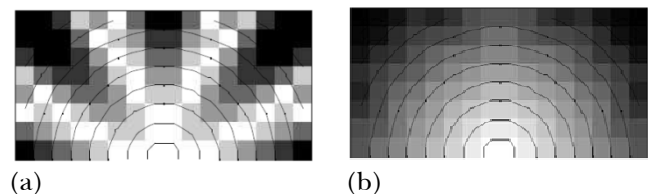


Figura 4 - Distribuição dos fluxos acumulados: (a) para o algoritmo D8 e (b) para o algoritmo de fluxo múltiplo (TARBOTON, 1997).

Métodos de MD em que a inclinação do terreno é variável de fundamental importância permitem que o fluxo de um *pixel* seja disperso para todos os *pixels* vizinhos de menor elevação. Tarboton (1997) evidencia que a dispersão é inerente a qualquer um destes modelos, onde um *pixel* atribui fluxo para mais de um *pixel* vizinho da curva descendente. A dispersão do fluxo é apontada como uma das principais desvantagens do método. O processamento de 8 direções possíveis e a necessidade de armazenamento de 8 números para o cálculo do valor de cada *pixel* pode comprometer o armazenamento de dados. Em contrapartida, este modelo evita a ten-

dência para a definição da direção do fluxo devido a estrutura matemática da matriz.

Neste sentido, a distribuição dos fluxos acumulados pode ser verificada no seguinte esquema (Figura 4):

Algoritmo de direção combinada de fluxo

Este algoritmo denominado de fluxo combinado (MDD8) calcula a acumulação do fluxo por meio do uso combinado entre o algoritmo de fluxo de direção única e múltipla (Figura 5). O MD é usado até atingir um valor limite específico, e posteriormente, o processamento passa a se dar pelo algoritmo D8, que determina a acumulação subsequente nos setores a jusante. O método garante a consistência da dispersão do MD para o cálculo exato das áreas de captação bem como a concentração da descarga coerente com a morfologia no rio (uso de D8 sem dispersão) (SCHÄUBLE, 2004).

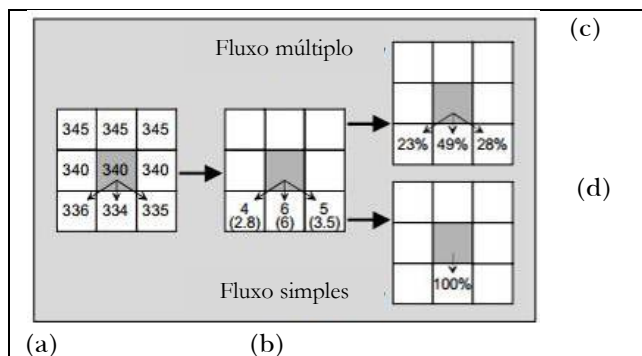


Figura 5 - (a) MDE com valores altimétricos dados em metros; (b) ajuste dos valores de altitude em função da maior distância calculada nas células das extremidades (2,8; 6 e 3,5); (c) cálculo pelo algoritmo MD; (d) cálculo pelo algoritmo D8 (SCHÄUBLE, 2004).

Modelagem hidráulico-hidrológica

A avaliação dos algoritmos de concentração de fluxo para determinação de áreas suscetíveis a alagamentos/inundações, tendo em vista sua aplicabilidade em estudos de planejamento urbano, foi confrontada com a metodologia tradicional, baseada na modelagem hidráulica e hidrológica, por meio do Método do *Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 1986). A área de interesse refere-se à bacia hidrográfica do Córrego da Servidão, afluente do Rio Corumbataí, onde se instalou a maior parte do sítio urbano da cidade de Rio Claro (SP). Este município

localiza-se na porção centro-leste do estado de São Paulo.

A bacia em questão foi modelada a partir do Método do *Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 1986). O SCS sugeriu em 1972 um modelo empírico para estimar a chuva excedente com base no potencial de absorção de umidade do solo. No SCS foi estabelecida uma relação empírica das parcelas de infiltração inicial e após escoamento com a capacidade de armazenamento no solo das precipitações na bacia hidrográfica. A capacidade de armazenamento do solo foi associada a um índice denominado Curva Número – CN ou Número de Deflúvio (CANHOLI, 2005).

A estimativa do valor de CN baseia-se em características do tipo de solo (grupos hidrológicos), do uso da terra e da condição de umidade antecedente. Sob as mesmas condições de precipitação, baixos valores de CN indicam que a superfície tem um alto potencial de retenção de água, enquanto valores de CN mais altos indicam potencial de retenção mais baixo (SCHAFER et al., 2011). O algoritmo para a conversão chuva-vazão pelo método do SCS é dado pelo conjunto de equações de 2 a 4.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{para } P > 0,2S \quad (2)$$

senão: $P_{ef} = 0$

Em que:

P = precipitação acumulada (mm);

S = potencial máximo de armazenamento do solo.

Para a obtenção da capacidade máxima de armazenamento do solo (S) foi empregado o algoritmo dado por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Em que: CN é o número de deflúvio e varia entre 0, para condutividade hidráulica infinita, e 100, para uma bacia totalmente impermeável.

Conforme a metodologia proposta pelo *Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 2004), a vazão de pico do hidrograma sintético unitário triangular é dado pelo conjunto de equações 4.

$$q = \frac{0,208 \times A}{t_a} \quad ; \quad t_a = t_p + \frac{D}{2} \quad ; \quad t_p = 0,6.t_c \quad (4)$$

Em que:

q = vazão de pico unitária ($\text{m}^3/\text{s}.\text{mm}$), para $P_{ef} = 1$ mm; A = área da bacia (Km^2); t_a = tempo de ascensão (horas); t_p = tempo de pico (horas); D = duração da precipitação (horas); t_c = tempo de concentração da bacia hidrográfica (horas).

Os valores de CN foram obtidos a partir da ponderação das áreas ocupadas por cada tipo de uso da terra, sendo que tais tipos foram identificados por meio da interpretação de fotografias aéreas (aerolevanteamento de 2006 – BASE S.A. Aerolevanteamentos) e excursões a campo. Os parâmetros de caracterização dos canais primários, também obtidos em campo, definiram os dados de entrada para a estimativa do escoamento superficial na bacia. O software livre IPHS1 foi utilizado para a implementação dos dados de entrada conforme os algoritmos de propagação em canal Muskingum-Cunge com planície de inundação para seções abertas e Muskingum-Cunge Não Linear para as seções fechadas, e propagação em reservatório por meio do modelo de Puls.

Os referidos modelos foram combinados com base na Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos, apresentada por Viegas Filho (2000), empregando o programa computacional denominado IPHS1 apresentado em Tucci et al. (1989). A partir das séries históricas de 1936 a 2004, Moruzzi e Oliveira (2009) determinaram a equação de chuvas intensas, caracterizada pela relação entre a intensidade, duração e frequência das máximas precipitações (IDF) para Rio Claro, conforme a Equação 5.

$$I = \frac{560,9.T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}} \quad (5)$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

d = duração da chuva (minutos).

Os hietogramas de projeto foram obtidos a partir da IDF de Rio Claro para chuvas de 1 hora de duração, a qual representa a mesma ordem de grandeza do tempo de concentração da bacia hidrográfica estudada. Foram definidos em 6 intervalos de 600s, a partir da altura da lâmina desagregada, correspondentes a intervalos de 1/10 da duração total da chuva conforme recomendado por Tucci (1998) e Canholi (2005). O Método dos Blocos Alternados foi empregado considerando o posicionamento do pico no centro de massa da tormenta, ou seja, os picos são definidos entre os 30 e 40 minutos

do período de chuva. Os tempos de retorno (TR) foram de 5, 10, 20 e 50 anos, correspondentes a probabilidades anuais de 0,20, 0,10, 0,05 e 0,02, respectivamente. O hidrograma foi propagado na bacia hidrográfica de acordo com o método do hidrograma triangular do *Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 2004). O ponto de controle para construção dos hidrogramas foi definido com base em localidades com registros históricos de eventos.

APLICAÇÃO

As metodologias apresentadas foram organizadas em etapas, nas quais se definiu a geração do MDE para diferentes resoluções espaciais (1m, 5m e 15m), e posteriormente, cada um dos MDE foi tratado em diferentes tipos de processamento para a obtenção do fluxo acumulado a partir dos algoritmos D8, MD (múltiplo) e MDD8 (combinado). Assim, têm-se as etapas de desenvolvimento com base no modelo seguinte (Figura 6):

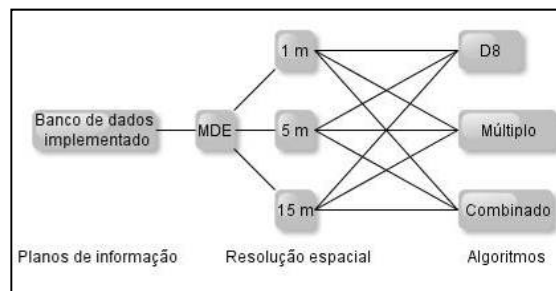


Figura 6 - Fluxograma das etapas desenvolvidas.

Primeiramente, foi necessária a geração de uma superfície contínua, dada pelo MDE, a fim de representar as formas de relevo (convexidades e concavidades) e associá-las ao escoamento dos fluxos d'água (dispersão e concentração/acumulação) ao longo da bacia de interesse.

Tendo em vista a questão do planejamento das áreas susceptíveis a inundações, o ideal é considerar a relação do escoamento de superfície com a urbanização. Assim, é importante que a base cartográfica tenha curvas de nível atualizadas devido às interferências da urbanização no terreno, como alteração do relevo por aterros e estradas. A base utilizada já contemplou a movimentação de terra em função da urbanização, de forma que o resultado das áreas de acumulação apresenta parte da interfe-

rência de ruas existentes, exceto as consequências de coletores da rede de microdrenagem.

Considerando que o objetivo da modelagem digital de elevação do terreno - MDE é a identificação de áreas que tendem a concentração de fluxos secundários e não apenas o fluxo do canal principal, foi criado um arquivo *drenagem* para representar as principais ruas que concentram o escoamento (enxurradas) e que contribuem em termos de volume de água, como 'tributários' que drenam para o canal principal. Foi utilizada a ferramenta *topo to raster* (disponível em *Spatial Analyst Tools/Interpolation*), do software ArcGis 10, e os seguintes planos de informação (em formato *shapefile*) (Figura 7):

- Drenagem (fluxo primário e secundário) – com base na Planta Cadastral Municipal, em formato digital, na escala de 1:10.000, obtidas a partir do aerolevantamento de 1978, com atualizações nos anos de 1984 e 2000;
- Curvas de nível com equidistância de 5 metros e pontos cotados em meio digital extraídas da Carta Topográfica de Rio Claro, na escala de 1:10.000 (IGC/SP), obtidas pelo CEAPLA/IGCE/UNESP-Rio Claro;
- Limite da bacia de interesse (obtidas pelo CEAPLA/IGCE/UNESP-Rio Claro);

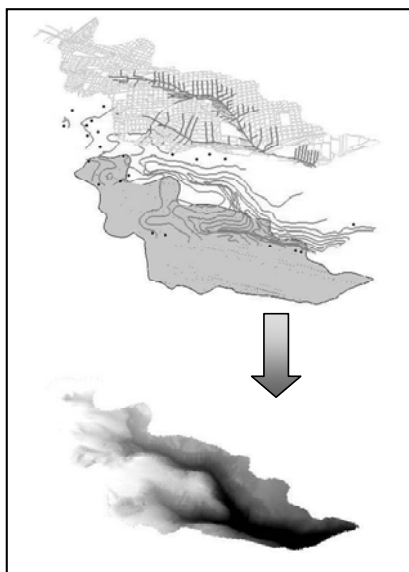


Figura 7 - Planos de informação rede de drenagem, curvas de nível e pontos cotados e limite da bacia para a interpolação e obtenção do MDE.

Estes dados interpolados geraram uma grade retangular (matriz) que representa uma superfície contínua com base nos dados de elevação da ba-

cia. Nesta etapa define-se a resolução espacial, ou seja, estipula-se qual será a área representada por cada *pixel*. Neste procedimento busca-se a obtenção de resultado com o maior detalhe possível, considerando a resolução da base cartográfica, o processamento computacional e a necessidade da abordagem da pesquisa.

No presente estudo, a base cartográfica apresenta curvas de nível a cada 5 m. A partir do software ArcGis versão 10, foi realizada a avaliação da interferência da escala, evidenciada a partir das seguintes resoluções espaciais (tamanho da célula de saída em metros):

- 1 x 1, visando a otimização da resolução espacial (com *pixel* representando uma área de 1 m²);
- 5 x 5 (similar a escala da base cartográfica), onde a área de cada *pixel* equivale a 25 m²;
- 15 x 15 (*default*, sendo a área de cada *pixel* de 225 m²);

Devido a disponibilidade dos algoritmos sugeridos, os MDE foram submetidos aos processamentos de preenchimento das depressões, determinação da direção e acumulação dos fluxos por meio do software ArcView na versão 3.2. Os procedimentos adotados e descritos a seguir encontram-se em Schäuble (2004) e Fontes (2009).

Como os MDE obtidos apresentam feições de depressão que se comportam como barreiras para a fluidez do escoamento, foram realizados procedimentos de preenchimento das depressões, sendo utilizada a ferramenta *Filling Sinks (Hydro Tools 1.0/Preparation)*, visando à obtenção de uma matriz adequada. Uma vez realizados os procedimentos de correção matemática, os MDE encontram-se tratados para a obtenção de mapas contendo a direção dos fluxos. Na interface *Hydro Tools 1.0/Preparation*, utiliza-se a ferramenta *Flow Direction*, sendo o dado de entrada o arquivo corrigido (*name_filled*). Estes procedimentos foram realizados para cada uma das resoluções espaciais em análise.

A geração de um mapa que expresse a tendência de acumulação dos fluxos para cada um dos algoritmos deu-se da seguinte maneira: para aplicação do algoritmo D8 (single flow), utilizou-se a ferramenta *Flow Accumulation (Hydro Tools 1.0/Hydrology)*, sendo o dado de entrada o mapa de direção de fluxo.

Para a aplicação dos modelos MD e MDD8, o mapa de direção de fluxo sofreu nova correção matemática, etapa que se constitui na suavização dos obstáculos da superfície da área a jusante para evitar

descontinuidades da estimativa de acumulação dos fluxos. Utilizou-se a ferramenta *DEM Correction (Hydro Tools 1.0/Preparation)*. Posteriormente, as matrizes obtidas foram o input para a geração de mapas de fluxos acumulados.

Para o cálculo das áreas da superfície de acumulação, foram realizados procedimentos de reclassificação, ou seja, as classes intermediárias foram reagrupadas, onde se definiu a área da bacia (superfície de dispersão) e superfície de acumulação. O limite das classes foi definido pela semelhança do tamanho das áreas, de modo proporcional ao número de *pixels* (Fig. 8 a, b e c).

RESULTADOS

Tendências de acumulação de fluxos

Os procedimentos geraram MDE para as diferentes resoluções espaciais (a, b e c). Cada um dos MDE sofreu processamento, sendo obtido um mapa de fluxo acumulado conforme algoritmos D8, MD e MDD8.

Os resultados são exemplificados na Figura 8, com destaque para o setor do Mercado Municipal. Apesar da bacia caracterizar-se por baixa densidade de drenagem e terreno arenoso, o que implica em boas condições de permeabilidade, este trecho apresenta mudança de direção do curso principal, com orientação NE/SW, sugerindo maior potencial de acumulação de água.

Conforme a Figura 8, as áreas mais claras indicam que a área de contribuição de montante é de pequena dimensão. A maior intensidade de cinza expressa a contribuição de maiores áreas de montante. A distribuição das classes foi inicialmente definida a partir da alta frequência de valores inferiores a 5.000 *pixels*, como forma de identificar a faixa de interesse do histograma. O limite estabelecido para a classe superior (>5.000 *pixels*) deveu-se a baixa frequência de ocorrência de número de *pixels* com valores superiores a esse limite, o qual representa o fluxo do canal principal.

Por meio de análise visual verificou-se que o uso de MDE que extrapolam a resolução da base cartográfica, como em (a), gera uma fragmentação significativa de tons mais intensos, o que leva a identificação de muitas áreas de contribuição desconexas. Assim, tal generalização impossibilita a delimitação pontual de áreas de acumulação. Enquanto que nas resoluções de (b) e (c), áreas com tendên-

cia a alagamento são agrupadas, identificadas pontualmente e de fácil interpretação.

Apesar da disponibilidade de dados altimétricos a cada 5m, exigiu-se do algoritmo de interpolação um parâmetro de escala superior, de 1m (a). Para a resolução de 5m (b), a área de cada célula (*pixel*) é de 25 m², enquanto que em matrizes de 1 x 1 a célula representa apenas 1 m², ou seja, torna-se necessário o cálculo para maior quantidade de *pixels* (25 vezes mais). Neste sentido, quanto melhor a resolução espacial, maior quantidade de *pixels* e valores de elevação a serem estimados, o que demanda tempo de processamento e disponibilidade computacional.

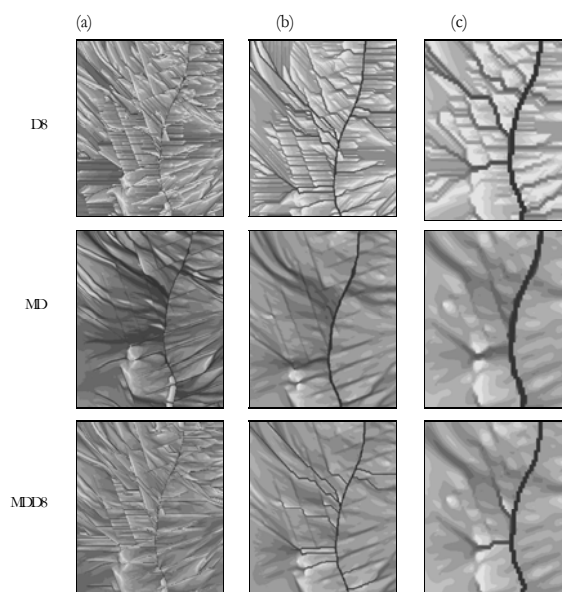


Figura 8 - Exemplo de acumulação de fluxo (setor do Mercado Municipal). a) resolução espacial de 1 m; b) resolução espacial de 5 m; e c) resolução espacial de 15 m.

A resolução espacial de 5m (b), que corresponde a mesma escala da base cartográfica, não apresenta fluxos secundários bem definidos, no entanto, é a que permite a melhor interpretação das áreas de acumulação, especialmente no que se refere ao algoritmo MD. Em (c), na qual a célula representa uma área de 225 m², há uma tendência de direção de fluxos secundários bem definidos, sendo possível verificar as áreas de maior propensão a alagamentos, principalmente para o algoritmo MDD8.

Em modelos que se utilizam do D8, seja para a obtenção de direção de fluxo simples (D8) ou de modo combinado (MDD8), verifica-se a geração

de representações espaciais que evidenciam mais a direção do fluxo, sendo esta mais bem definida que a própria tendência de acumulação, de interesse neste estudo. Na aplicação do D8, devido a seu procedimento de cálculo para uma única direção de fluxo dentro de 8 possibilidades, a tendência de acumulação não encontra-se articulada à continuidade das vertentes.

Visualmente, fluxos de direção única D8 não representam grandes áreas de acumulação, mas múltiplas áreas desconexas. A fragmentação das áreas de acúmulo impossibilita a geração de planos de informação contendo apenas o limite das áreas susceptíveis a alagamento. Esta característica fica mais evidente principalmente em (a) e (b). Quanto à resposta da resolução espacial de 25 m (c), constata-se que apesar das áreas de acumulação não serem evidentes, esta destaca a possibilidade de identificação de fluxos secundários bem definidos. Tais dados aplicados ao planejamento urbano podem nortear a implantação de redes de captação pluvial. O método do MDD8 executa o cálculo a partir de direções únicas, e na medida em que se aproxima de setores a jusante, o cálculo passa a ser gerido pelo MD. Verifica-se que para atender a identificação das áreas de risco a alagamento a resolução (c) obteve a melhor resposta visual. Enquanto (a) apresentou tendência de fluxos descontínuos, sem acompanhar a tendência natural das vertentes, e (b) apresentou tanto áreas suscetíveis a alagamento quanto fluxos secundários bem definidos.

Para o presente estudo, a aplicação da técnica do fluxo de múltiplas direções (MD) obteve a melhor resposta. Antes da apresentação dos resultados referentes ao índice de acumulação tridimensional de fluxo, foi realizada uma análise de sensibilidade desse índice para diversificadas formas de vertente, parametrizadas em função da área e admitindo escoamento unidirecional. Na Figura 9 pode-se visualizar o comportamento do índice de acumulação de fluxo para vertentes côncavas, convexas e retilíneas. O eixo das ordenadas representa as relações de área parametrizadas, em que o quociente de valor zero indica a porção de montante e o quociente de valor 1 indica o trecho final de jusante. Fica evidente que a acumulação em vertentes côncavas ocorre na porção de jusante, quando a área de contribuição de montante é máxima e a declividade é mínima. Para vertentes convexas, ocorre a dispersão de fluxo de montante para jusante, na medida em que o índice de acumulação de fluxo (In) decresce na porção de jusante. Na vertente retilínea o valor do índice In converge rapidamente para seu valor

máximo e não sofre incremento de montante para jusante.

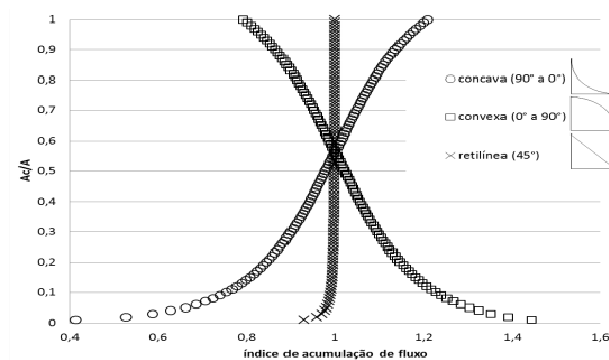


Figura 9 - Análise do índice de acumulação de fluxo (In) parametrizado para vertentes hipotéticas de formas côncavas, convexas e retilíneas.

Na análise final, o intervalo de classes do mapa de acumulação de fluxo foi reorganizado. Para isso, verificou-se a correspondência de acumulação de fluxo em conformação com as curvas de nível que indicam a planície de inundação e a concavidade de vertente, ou seja, realizou-se uma análise topográfica para avaliação da concentração de área drenada. Dessa forma, foram definidas duas classes: não inundáveis e suscetíveis à inundação. Como resultado, para qualquer um dos algoritmos em questão, obteve-se o limiar que definiu a separação das classes entre os valores de 0,004% a 0,06 % (média de 0,03 %), em relação ao número máximo de *pixels*. Ressalta-se que quanto melhor/superior for a resolução espacial, menores devem ser os valores do limiar. Para a resolução espacial de 5m obtida pelo algoritmo MD, por exemplo, obteve-se o máximo de 476.223 *pixels* que drenam para um determinado setor da bacia hidrográfica. Assim, utilizando-se o limiar médio de 0,03% do máximo de *pixels*, a reclassificação dos *pixels* em duas classes é dada por: de 1 a 140 *pixels* para áreas não inundáveis e superiores a 140 para áreas suscetíveis à inundação. O resultado dessa reclassificação para diferentes resoluções espaciais (a), (b) e (c) podem ser comparadas a partir da Figura 10.

Ressalta-se que para análise de tendência de acumulação de fluxo, o algoritmo MD mostrou-se adequado para as diferentes resoluções espaciais. No entanto, as resoluções (b) e (c) apresentaram maior continuidade da superfície de alagamento, sendo estas de resultados mais satisfatórios tendo em vista a

aplicabilidade da metodologia ao planejamento. Desta forma, considerou-se que as resoluções iguais ou inferiores a escala da base cartográfica apresentam resultado mais satisfatório.

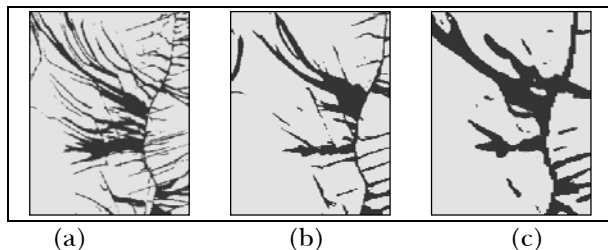


Figura 10 - Comparação das diferentes resoluções espaciais para o algoritmo MD. a) resolução espacial de 1 m; b) resolução espacial de 5 m; e c) resolução espacial de 15 m.

Os procedimentos de reclassificação permitiram o cálculo das áreas suscetíveis a alagamento. As diferentes resoluções espaciais resultaram nas seguintes áreas de inundação: (a) 1.755,165, (b) 2.399,125 e (c) 2.895,975 m². A continuidade da superfície de alagamento em (b) e (c) contribuíram para o cálculo de área de valores mais próximos, e, portanto, confirmam a melhor aplicabilidade de tendência de acumulação dos fluxos semelhante ou inferiores a resolução espacial da base cartográfica.

Modelagem

Fundamentada na caracterização da cobertura de uso da terra, obtida por meio de técnicas de geoprocessamento e análise interpretativa de fotografias aéreas (aerolevantamento de 2006 e escala nominal de 1:30.000), foram obtidos os valores da CN, estimados entre 79 e 90, confirmando a alta impermeabilidade do solo devido a urbanização. Nas áreas permeáveis, a bacia caracterizou-se por solos arenosos sem impedimento de drenagem, e umidade do solo correspondente a capacidade de campo, conforme Moraes (2011). A modelagem hidrológica permitiu a transformação de chuva em vazão (representada por Q), ou seja, o volume de água precipitado (P), representado por hietogramas, e em saída de água (escoamento) distribuída no tempo, representado por hidrogramas (Figura 11). Para os volumes que caracterizaram a situação de alagamento nas ruas denominou-se vazão de extravasamento (QE), especializado conforme Figura 12.

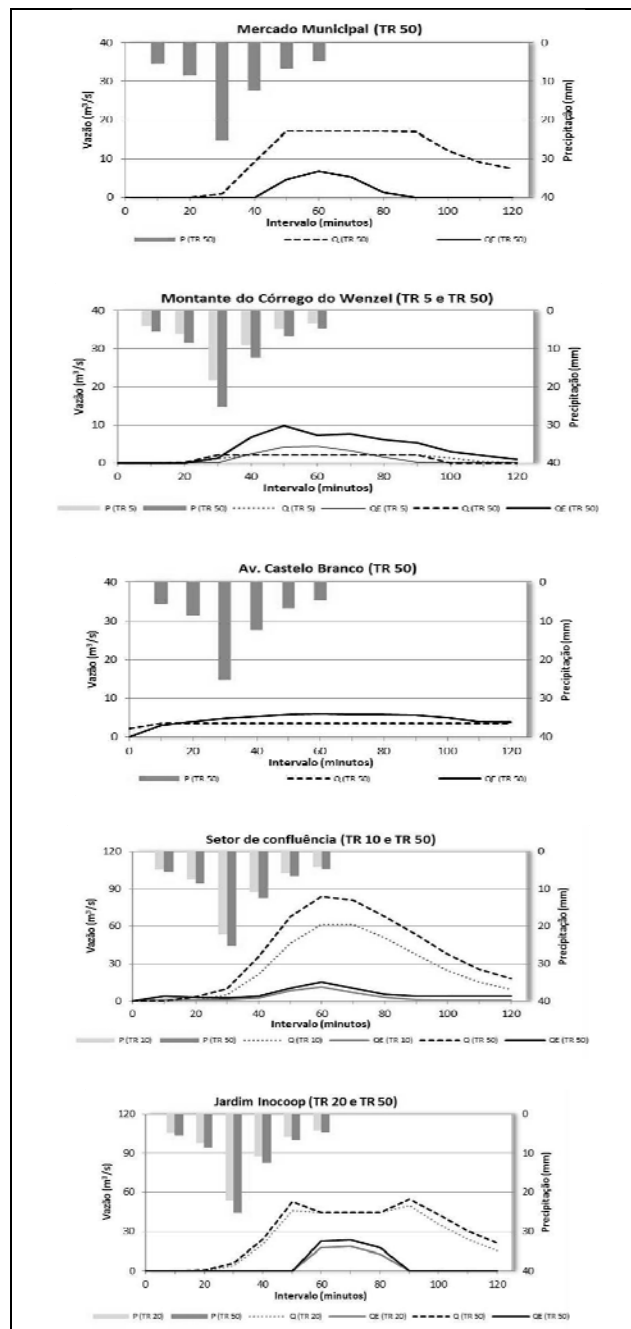


Figura 11 - Hidrograma de cheias e vazão de extravasamento para os pontos de inundação.

Por meio da modelagem hidrológica e hidráulica foram avaliados os pontos de alagamento, o que resultou na representação da vazão de extravasamento na rua, confirmando os registros históricos de inundações. Assim, o volume de água acumulado em superfície, superior à capacidade de escoamento pela rede de drenagem, constata a suscetibilidade a riscos de inundação em diferentes setores da bacia.

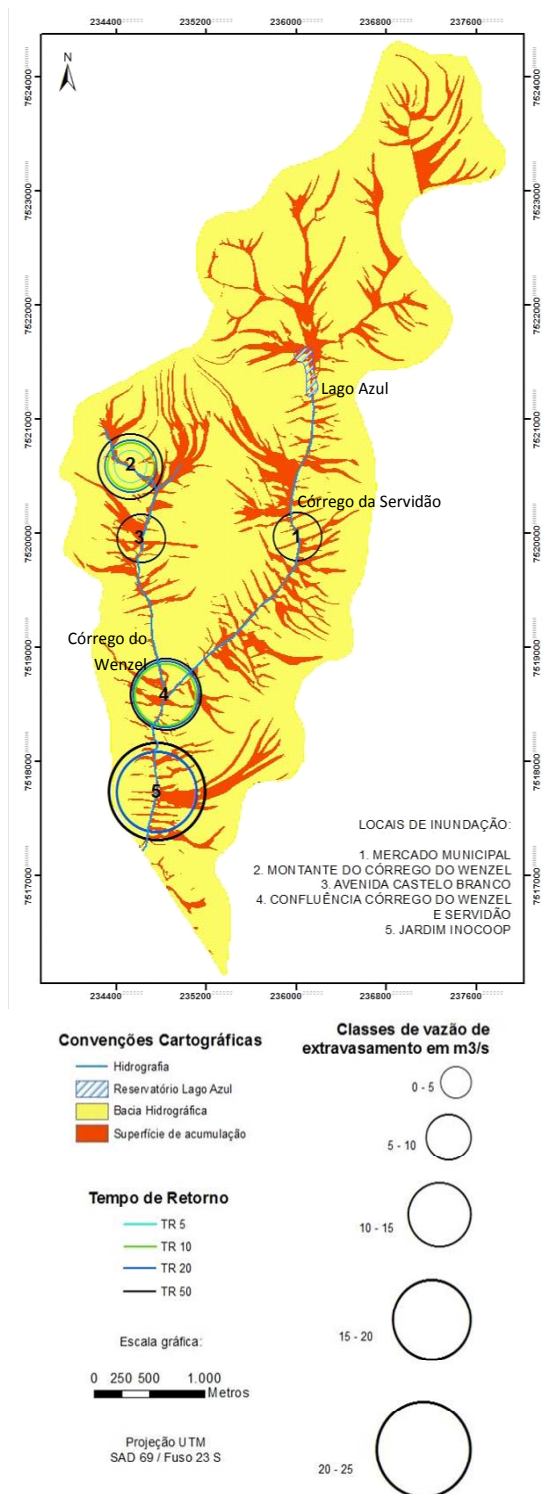


Figura 12 - Sobreposição da distribuição espacial dos pontos de inundação, conforme a modelagem hidrológica e hidráulica, e o mapa da superfície de acumulação.

Tais dados comparados à superfície de tendência de acumulação dos fluxos demonstram pontos de alagamento coincidentes e/ou próximos (Figura 12). Em alguns setores, a modelagem apontou vazão de extravasamento à jusante dos locais de acumulação indicados a partir do MDE, devido à caracterização dos trechos por canais fechados. A ausência de alagamento pela modelagem no setor montante é devido à presença do reservatório Lago Azul responsável pela captação da água excedente e que, portanto, evita inundações na maioria dos eventos críticos de precipitação. Ademais, vale mencionar que os pontos identificados apresentam problemas recorrentes de enchentes, sendo frequentemente noticiados pela imprensa local.

Assim, foi possível constatar que a aplicação do modelo hidráulico-hidrológico exige o levantamento de uma série de dados em campo e no laboratório, os quais demandam tempo e recursos. Quando os dados obtidos com essa modelagem são confrontados com o mapeamento de fluxo acumulado, constata-se que os setores apontados como de possível inundação são coincidentes. Dessa forma, é possível afirmar que o mapa de acumulação de fluxo, quando elaborado com bom nível de resolução, como já discutido, pode agilizar a identificação de áreas suscetíveis à inundação.

CONCLUSÕES

O uso da modelagem hidráulica e hidrológica permitiu a análise da adequação do uso de MDE aplicado à suscetibilidade a inundações. Por meio de uma base cartográfica consistente e resolução espacial de detalhe para pequenas bacias hidrográficas verificou-se a possibilidade de uso de geotecnologias e ferramentas de geoprocessamento para a definição de locais críticos quanto à ocorrência de alagamento.

Dos diferentes algoritmos testados, constatou-se que o uso do cálculo de fluxo múltiplo (MD) é o mais adequado na identificação de superfície com tendência de acumulação de fluxos. O produto cartográfico gerado aponta resultados espaciais coerentes com aqueles obtidos pelos procedimentos da modelagem pelo método do *Soil Conservation Service*, indicando a viabilidade do uso da metodologia proposta para fins de planejamento.

Desta forma, os procedimentos empregados são menos onerosos e capazes de nortear ações que visem o gerenciamento dos recursos hídricos integrados às características geomorfológicas da área. A

agilidade das ferramentas de geoprocessamento se ajusta a dinâmica da ocupação urbana, e, portanto, sugere um viés hidrológico a gestão do território.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CNPq pelo suporte financeiro deste trabalho (Processo nº 475291/2009-3) e a CAPES pela cessão da bolsa de Mestrado a Isabel Cristina Moraes.

REFERÊNCIAS

- BIAN, L. Multiscale nature of spatial data in scaling up environmental models. In: QUATTROCHI, D.A.; GOODCHILD, M.F. (Ed.). *Scale in remote sensing and GIS*. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.13-26.
- BUARQUE, D.C. FAN, F.M., COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 2, p. 91-109, 2009.
- BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. Principles of Geographical Information Systems. London: *Taylor & Francis*, 1998, 333 p.
- CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, 302 p.
- CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. *Resolução espacial de um modelo digital de elevação definida pela função wavelet*. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 47, n. 3, p.449-457, 2012.
- COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre (SP). 2001. p. 270. (Tese de doutorado).
- FELICÍSIMO, A.M. Modelos Digitales del Terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. *Pentalfa Ediciones*, Oviedo, 1994, 222 p.
- FONTES, N. *Proposta metodológica para o planejamento de sistemas de espaços livres*: Ribeirão Preto – SP. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP. 2009. 193 f. (Tese de doutorado).
- FREEMAN, G.T. Calculating catchment area with divergent flow based on a rectangular grid. *Computers & Geosciences* 17, 1991. 413-422.
- HENGL, T. *Finding the right pixel size*. *Computers and Geosciences*, v. 32, p.1283-1298, 2006.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1998.
- MILLER, C.I.; LAFLAMME, R.A. The Digital Terrain Model: Theory & Application. M.I.T. Photogrammetry Laboratory, 1958 - 20 p
- MORAES, I.C. *Análise da dinâmica do uso da terra e sua interferência em inundações na cidade de Rio Claro (SP)*. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP. 2011. 114 f. (Dissertação de mestrado).
- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, S.C. de. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. *Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 9, n. 13, 2009.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The Extraction of Drainage Networks From Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, v. 28, p. 328-344, 1984.
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models. *Hydrological Processes*, v. 5, p. 59-80, 1991.
- SCHAFER, A.G.; NOGUEIRA, R.E.; SLUTER, C.R. *Desenvolvimento de um banco de dados geográfico para a estimativa do potencial de retenção em áreas de drenagem*. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011. Curitiba-PR. *Anais...* Curitiba-PR: SBSR, 2011. p.8709.
- SHÄUBLE, H. (2004). *HydroTools 1.0 for ArcView 3.x*. Disponível em: <www.terracs.com/fileadmin/webpage/docs/hydrotools-german.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2013.
- TARBOTON, D. A new method for determination of flow directions and upslope area and grid digital elevations models. *Water Resources Research*, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998, 668 p.

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO H. D. *Sistema de Simulação Precipitação Vazão IPHS1*. IPH-UFRGS, Porto Alegre, 66 p. 1989.

USDA SOIL CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook Section Hydrologic Soil-Cover Complexes, chapter 9, 2004.

VALERIANO, M.M. Mapeamento de declividade em microbacias com Sistemas de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.303-310, 2003.

VIEGAS FILHO, J.S. *O paradigma da modelagem orientada a objetos aplicada a sistemas de apoio a decisão em sistemas de recursos hídricos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS. 2000. p. 547. (Tese de doutorado).

WU, W.; FAN, Y.; WANG, Z.; LIU, H. Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 126, p.209-216, 2008.

tershed (SP-Brazil), thus constituting a simple and feasible planning tool.

Key-words: DEM; urban flooding; planning instruments;

Comparison Of Methodologies To Define Accumulated Flows From Digital Models Of Terrain Elevation Applied To Flood Susceptibility

ABSTRACT

Studies concerning flood risk assessment are extremely important for planning the occupation of urban spaces. However, this evaluation is not always feasible due to complex analyses involved, which are substantiated by physically based models that should reflect the hydrological specificities and consider the spatial heterogeneity of the basins. However, the absence of primary data and the time available for model implementation often compromise such an analysis. Thus, the use of geotechnology and of database mapping to relate the topographic features and drainage system of an area can assist in identifying areas in which the concentration of runoff could potentially lead to flooding. In this sense, the present study aimed to evaluate the accumulated flows using the Digital Elevation Models - DEM and geoprocessing tools in order to identify susceptible flooding areas and to propose management planning. Beginning with the DEM of different spatial resolutions methodologies were employed for the evaluation of algorithms related to the direction and accumulation of flow. The spatial analysis of the surface flow accumulation showed consistent results when compared to hydrogeomorphological aspects and to those obtained using hydraulic and hydrologic models of the Servidão creek wa-