SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA UTILIZANDO O HIDROGRAMA UNITÁRIO DERIVADO DO MODELO NUMÉRICO DO TERRENO

Walter Collischonn[1], Jorge V. Pilar[2], Marcus A.S. Cruz[3], Eduardo M. Mendiondo[4]; Carlos A. B. Mendes[5]

Resumo – Este trabalho apresenta a uma metodologia de obtenção do hidrograma unitário, por aplicação de técnicas de geoprocessamento, a partir do modelo numérico do terreno. São descritas as etapas da obtenção do hidrograma unitário bem como as aplicações numa bacia agrícola de 1,1 km^2 localizada nas cabeceiras do rio Uruguai, lado brasileiro. A comparação entre hidrogramas de escoamento superficial calculados, utilizando o hidrograma unitário, e os hidrogramas observados, baseados na separação do escoamento superficial dos hidrogramas medidos, mostra bons resultados.

Astract – This paper presents a method to determine the unit hydrograph, based on the digital elevation model of the watershed. The procedure is described step by step for a 1,1 km^2 rural watershed located in the Uruguai river basin, and applied for two rain events. Comparisons show that calculated and observed hydrographs agreed well.

Palavras-Chave - geoprocessamento, MNT, simulação.

[1] cllschnn@vortex.ufrgs.br

[2] jpilar@if.ufrgs.br

[3] mascruz@if.ufrgs.br

[4] emmsz@if.ufrgs.br

[5] cabmendes@cpovo.net

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal de RioGrande do Sul - Av. Bento Gonçalves 9500 - Caixa Postal 15029 - CEP 91501-970 - Poto Alegre, RS, Brasil. Tel: 00 55 51 316 6670. Fax: 00 55 51 319 1157

INTRODUÇÃO

O hidrograma unitário é definido como o hidrograma produzido por uma precipitação efetiva de lâmina unitária, homogênea sobre a bacia e de duração especificada. Admitindo que o comportamento da bacia seja linear, a sua resposta para eventos complexos de precipitação pode ser obtida a partir do hidrograma unitário e da precipitação medida.

Existem duas formas de obter o hidrograma unitário: diretamente, a partir de dados de hietogramas e hidrogramas medidos, ou indiretamente, a partir de equações baseadas em características físicas da bacia.

O hidrograma unitário obtido pela forma indireta, é chamado de hidrograma unitário sintético, e é mais comum, porque é aplicável a bacias sem dados. As equações para obter o hidrograma unitário sintético, como a de Snyder e a do SCS, estão baseadas em características físicas da bacia, como o comprimento do curso d'água principal e a declividade (Ponce, 1989).

Uma forma um pouco mais detalhada e trabalhosa de obter o hidrograma unitário quando não existem dados é através do histograma tempo área. Neste método as características físicas da bacia são mais profundamente exploradas, e o geoprocessamento, ou os sistemas de informações geográficas (SIG), podem agilizar o processo de obtenção do hidrograma unitário através do histograma tempo área (Muzik, 1996; Maidment, 1993).

Considerando uma precipitação efetiva unitária, uniformemente distribuída em toda bacia, o histograma acumulado é equivalente ao hidrograma unitário em "S", sendo a diferença entre eles apenas uma constante. Deslocando o hidrograma em "S" de um intervalo de tempo, obtém-se, por diferenças de ordenadas entre ambos, o HU. A definição conceitual do hidrograma em "S" é:

$$QS(t) = i_E . A(t) \tag{1}$$

onde **QS(t)** é a vazão acumulada no tempo **t** ; **A(t)** é a área de contribuição no tempo **t** (se o tempo é o tempo de concentração **tc**, a área **A(t)** é a área total da bacia), sendo $\mathbf{i_E}$ a intensidade unitária de chuva efetiva.

O hidrograma de escoamento superficial decorrente de uma precipitação efetiva de intensidade unitária e duração Δt é:

$$Q(t) = i_E . A(t) - i_E . A(t - \Delta t) \tag{2}$$

Por definição, a ordenada do hidrograma de escoamento superficial é obtida por:

$$Q = PRECIP \times HU \tag{3}$$

ou seja :

$$HU = \frac{Q}{PRECIP} \tag{4}$$

onde **Q** é a vazão de escoamento superficial; **PRECIP** a precipitação efetiva; **HU** a ordenada do hidrograma unitário.

Sendo $PRECIP = i_E \cdot \Delta t$, então:

$$HU = \frac{A(t) - A(t - \Delta t)}{\Delta t} \tag{5}$$

Uma vez obtidas as ordenadas do hidrograma unitário, a obtenção do hidrograma de escoamento superficial, para uma precipitação observada, pode ser feita aplicando a convolução discreta (Chow et al., 1994):

$$Q_t = \sum_{i=j}^{t} P_i \cdot h_{t-i+1} \tag{6}$$

sendo que para $\mathbf{t \leq n}$, $\mathbf{j = 1}$ e para $\mathbf{t > n}$, $\mathbf{j = t - n + 1}$. O significado dos termos é o seguinte: **t** t-ésimo intervalo de tempo; **n** número de ordenadas do hidrograma unitário; $\mathbf{P_i}$ precipitação efetiva no intervalo de tempo **i**; $\mathbf{h_k}$ k-ésima ordenada do hidrograma unitário; $\mathbf{Q_t}$ vazão de escoamento superficial no intervalo **t**.

Neste trabalho é apresentada a obtenção do hidrograma unitário, baseado no histograma tempo área, para uma bacia de aproximadamente 1 km^2 , utilizando técnicas de geoprocessamento, conforme Collischonn et al. (1998) e Santana et al. (1997). O hidrograma unitário assim obtido é testado, comparando resultados de simulações com dados observados na bacia, conforme Pilar et al. (1998).

METODOLOGIA

O fluxograma da figura 1 apresenta alguns dos produtos básicos, que podem ser obtidos a partir do MNT, e a sua seqüência lógica respectiva. A obtenção de cada um desses produtos implica na utilização de uma ou mais operações lógicas sobre o MNT original.

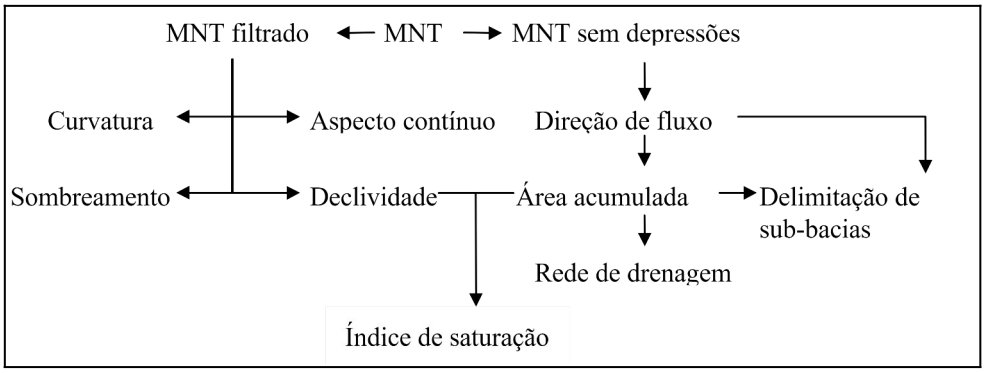


Figura 1: Fluxograma de obtenção dos parâmetros a partir do MNT.

Para gerar o hidrograma unitário são realizadas, primeiramente, as operações de remoção de depressões, área acumulada, rede de drenagem, direção de fluxo e delimitação de sub-bacias. O índice de saturação é apresentado também neste trabalho porque pode ser utilizado para estender o método proposto. Cada uma das operações é descrita a seguir.

Obtenção do MNT da bacia do Arroio Donato

A bacia do Rio Potiribú, localizada nas cabeceiras do rio Uruguai, é uma bacia piloto do IPH-UFRGS para estudos hidrossedimentológicos e impacto da agricultura. A sub-bacia do Arroio Donato, de apenas 1,08 km^2, localizada nas cabeceiras do rio Potiribu, foi considerada adequada para o teste de obtenção do hidrograma unitário. O MNT foi obtido usando, como função ponderadora da interpolação, o inverso do quadrado da distância. O MNT foi gerado para várias discretizações: 10x10, 30x30, 50x50 e 100x100. Neste trabalho apresentam-se resultados relativos à discretização de 30x30m conforme ilustrado na Figura 2 e Tabela 1.

TABELA 1: Características do MNT do Arroio Donato, Rio Potiribú, RS

Características	Valor
Área, Km^2	1,08
Perímetro, Km	4,54
Z mínimo, m	400
Z máximo, m	465
Vértices (Xmín, Xmáx; Ymín, Ymáx), m	0, 1632; 0, 1274
Equidistância das curvas de nível, m	5,0
Erro médio de georeferenciamento	
das isolinhas, m	4,40
do limite da bacia, m	6,01

Para uma discretização de 30x30 m, o MNT resultante corresponde a 42 linhas x 50 colunas. A figura 2 expressa o MNT através de uma escala de tons de cinza onde as cores escuras representam cotas topográficas da ordem de 400 metros e as mais claras de 465 metros.

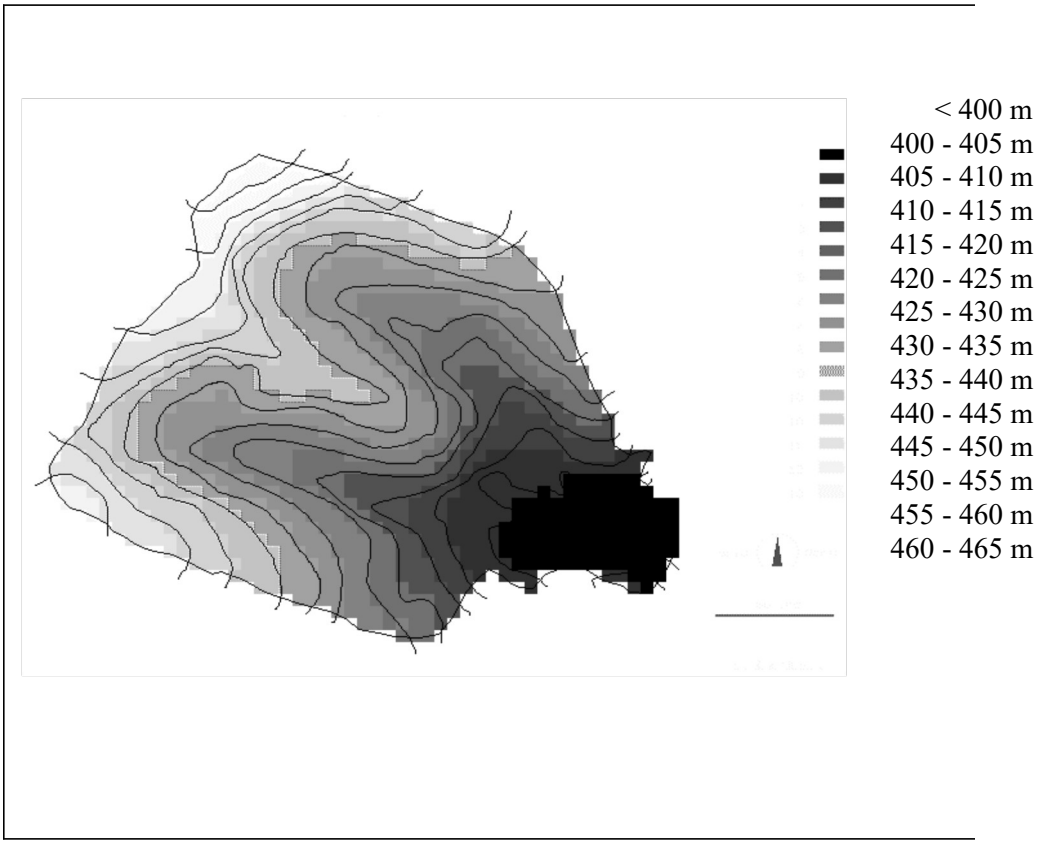


Figura 2: MNT do Arroio Donato, criado a partir das curvas de nível.

Remoção de depressões e as direções de fluxo

Existem dois parâmetros relacionados à direção preferencial da declividade do terreno. O primeiro é o chamado aspecto contínuo, descrito em Mendiondo et al. (1998b). O segundo é o aspecto discreto ou direção de fluxo, que é mais restrito, pois existem apenas oito direções possíveis, e se presta basicamente como base para o cálculo da área acumulada, pois garante a continuidade entre uma célula e outra (figura 3).

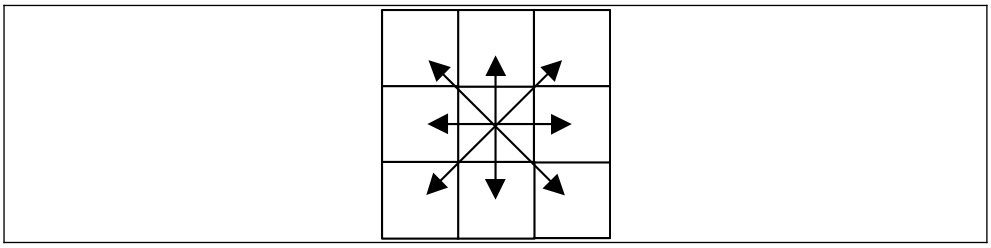


Figura 3: As oito direções de fluxo possíveis para uma célula.

Para obter o aspecto discreto, o MNT não deve apresentar depressões. Depressões são células ou grupos de células de altura inferior à altura de todas as células de sua vizinhança, onde a direção de fluxo é indeterminada (figura 4). As depressões são corrigidas acrescentando altura artificialmente, como mostra a figura 4.

O processo de remoção de depressões e de obtenção das direções de fluxo é realizado simultaneamente e de forma iterativa, finalizando quando o algoritmo que determina a direção de fluxo corrige as depressões em todo o MNT. As direções de fluxo são obtidas com uma janela móvel que percorre o MNT e atribui a cada uma das células um código que representa a direção de fluxo, que pode estar orientada para uma de suas oito células vizinhas. O critério para a escolha é a direção que apresenta a maior declividade. A declividade é calculada, neste caso, como a diferença entre a altura da célula vizinha e a célula central, dividida pela distância entre as células.

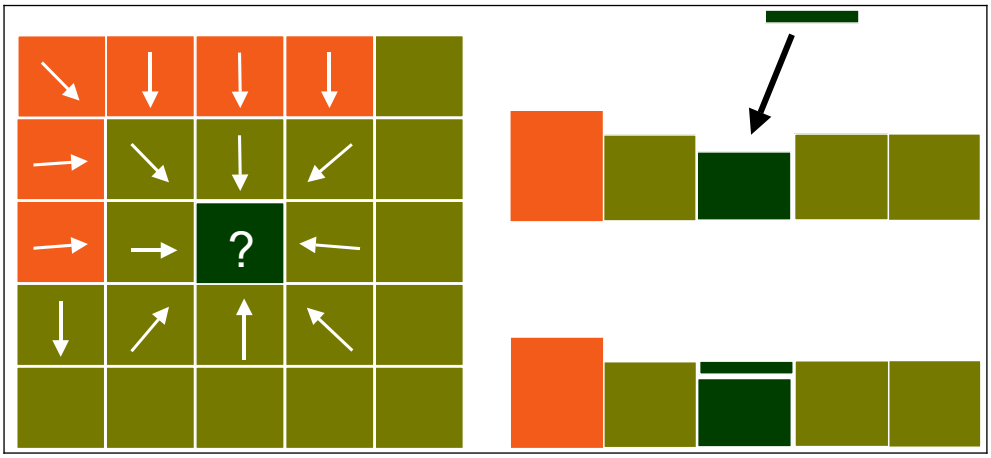


Figura 4: Depressão ou célula com direção de fluxo indeterminada, e o processso de correção das depressões.

A partir da direção de fluxo parcialmente obtida, que é uma imagem onde algumas células permanecem com um código que significa que a direção de fluxo permanece indefinida, é realizada a remoção de depressões. Todas as células marcadas têm a altura aumentada até igualarem a altura da mais baixa célula da vizinhança. O algoritmo de atribuição de direções de fluxo é novamente utilizado até que não permaneça uma única célula com direção de fluxo indefinida. Estes algoritmos, descritos por Jenson e Domingue (1988), alteram o MNT original para obter as direções de fluxo e a área acumulada.

A direção de fluxo de células que estão à mesma cota de suas vizinhas mais baixas é encontrada baseada na necessidade de encontrar uma saída para o fluxo. Quando uma célula está a mesma cota de suas vizinhas mais baixas, e não tem direção de fluxo definida, a direção de fluxo é atribuída a uma das células vizinhas que respeita as seguintes condições: 1) está a mesma cota da célula considerada; 2) tem direção de fluxo definida; 3) a direção de fluxo não é no sentido da célula considerada. Esta técnica, descrita em Jenson e Domingue (1988) permite definir as direções de fluxo de bacias com extensas áreas planas.

Área acumulada

A área acumulada sob o ponto de vista hidrológico é uma medida que integra o fluxo superficial ou sub-superficial da água a montante de um ponto do terreno. A área acumulada é importante para definir sub-bacias, rede de drenagem automaticamente e índices de saturação.

A partir da grade com as direções de fluxo, a área acumulada é obtida somando a área das células na direção indicada. A figura 5 apresenta este algoritmo. O tom do preenchimento das células indica a elevação, as setas indicam a direção do fluxo. Os números indicam a área acumulada em número de células e a célula com contorno marcado é aquela cuja contribuição está sendo considerada durante a leitura seqüencial do arquivo da grade. A primeira célula considerada é a do canto superior esquerdo. O mesmo processo segue até que se considere a célula do canto inferior direito.

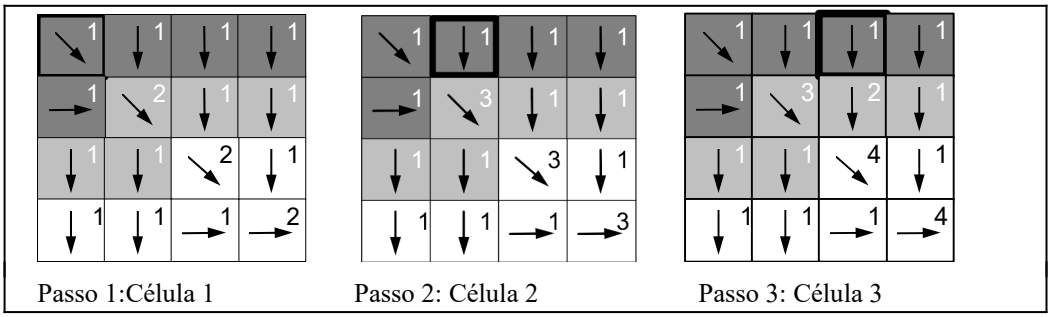


Figura 5: Estimativa de área acumulada segundo etapas consecutivas, de (a) até (c). A célula marcada indica o valor sendo considerado.

Delimitação automática de sub-bacias

Existem dois algoritmos básicos que são utilizados para definir sub-bacias. O primeiro marca os exutórios das sub-bacias e o segundo delimita-as a partir de seus exutórios. Os algoritmos apresentados aqui foram propostos por Jenson e Domingue (1988). Os procedimentos são realizados tanto sobre a grade de direções de fluxo quanto sobre a grade de área acumulada (figura 6).

Na marcação de exutórios o usuário define um limite de área, e do incremento de área entre duas células vizinhas. Este limite serve para definir os exutórios das sub-bacias principais e deve ser escolhido de acordo com as características do MNT e dos objetivos do trabalho.

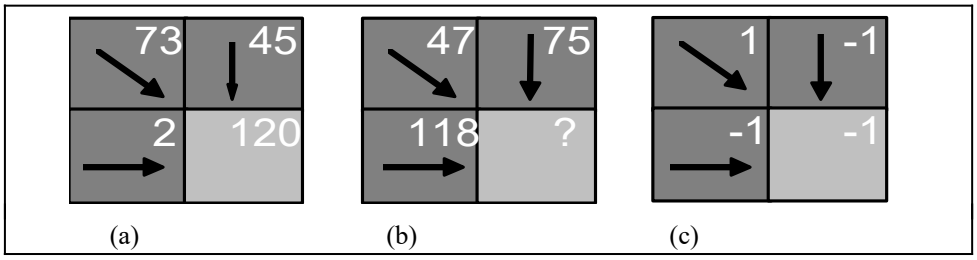


Figura 6: (a) Área acumulada e direção de fluxo; b) Incremento de área na direção de fluxo; c) Marcas de exutórios de sub-bacias considerando o limite igual a 46.

A seguir, para cada célula onde tanto a área acumulada como o incremento de área acumulada superam o limite definido, é atribuído um valor inteiro e maior que zero numa grade de exutórios de sub-bacias. Por exemplo na figura 6, se o limite fosse 46, apenas a célula superior esquerda em (b) definiria um exutório de sub-bacia, porque tanto

a área como o incremento de área nesta célula são maiores que o limite, portanto recebe o valor numérico "1". Todas as outras células recebem o valor "-1".

O algoritmo utiliza a grade com as marcas dos exutórios, que tem um exemplo simplificado na figura 6, e delimita as sub-bacias de jusante para montante seguindo na direção contrária à de fluxo. O resultado é uma grade em que cada célula faz parte de uma sub-bacia e é marcada com o valor dado ao exutório da sub-bacia.

Rede de drenagem

A rede de drenagem de um MNT é o grupo de células onde a área acumulada supera determinado valor e, teoricamente, coincide com a localização dos canais naturais no terreno real. A rede de drenagem e as sub-bacias têm aplicações múltiplas em Hidrologia. Dos parâmetros apresentados aqui, a rede de drenagem é o mais simples de se obter, considerando que já se conheça a área acumulada. Se a área acumulada de uma célula supera um limite determinado pelo usuário então esta célula faz parte da rede de drenagem e é marcada com o valor 1, caso contrário recebe o valor 0. A determinação do limite, Ac, depende do MNT, da sua discretização e, sobretudo, dos objetivos do trabalho.

O critério de separação foi que células com área contribuinte mínima de cinco pixels (4,5 ha) formam um canal preferencial de escoamento, o que é coerente com os valores obtidos por Mendiondo et al. (1998a), que observou, nesta bacia, que para plantio direto tem-se caminhos de escoamento preferenciais com áreas de aporte de 0,40 ha.

Declividade

A declividade é calculada a partir da diferença de altura entre duas células vizinhas: a célula de origem e a de destino. A célula de origem é a célula à qual é atribuída a declividade, e a célula de destino é a célula para a qual aponta a direção de fluxo, previamente obtida.

Este método encontra muitas células com declividade nula, porque tem cota idêntica a mais baixa das suas oito vizinhas. A declividade nula, embora seja possível, impede o uso da equação de Manning para o cálculo da velocidade e do tempo de passagem. Para evitar este problema, o cálculo da declividade foi adaptado nas situações em que, em uma primeira tentativa, a declividade era nula.

Sempre que as cotas das células de origem e destino são iguais, passa-se a célula seguinte para jusante, segundo as direções de fluxo, até que a cota seja inferior. Encontrada a célula com cota inferior, a declividade é calculada de uma vez só para todas as células, pela divisão entre a diferença de cotas e a distância percorrida (Santana et al., 1997).

Largura dos cursos de água

A largura do curso de água é um dado necessário para o cálculo da velocidade de deslocamento da água na rede de drenagem, mas não está disponível para toda a bacia. A

solução encontrada foi relacionar a largura à área de drenagem, por uma relação geomorfológica.

Segundo Christofoletti (1981) a área molhada de uma seção de canal tem uma correlação geomorfológica com a área contribuinte a esta seção. Sendo assim, existirá, igualmente, uma correlação entre a área contribuinte e a largura de uma seção. Neste trabalho utilizou-se uma correlação entre largura e área contribuinte do tipo:

$$B_i = a \cdot A_i^{\,b} \tag{7}$$

onde $\mathbf{B_i}$ é a largura do canal da célula **i**; $\mathbf{A_i}$ a área contribuinte para a célula **i**; **a** e **b** coeficientes a serem ajustados. Cabe destacar que a largura estimada pela fórmula (9) é uma largura **média**.

Estudando escoamentos concentrados na bacia do Donato, foi conferido que, tanto em canais efêmeros como em canais permanentes, **B >> h** (largura muito superior à profundidade d'água), sendo assim aceitável a hipótese de canais de grande largura.

Rugosidade

A partir de informações sobre cobertura vegetal e uso do solo, foram estimados valores de coeficientes de rugosidade para as células consideradas como canal. A diferenciação das coberturas vegetais e dos usos do solo foi feita com base em imagens de satélite LANDSAT (TM 3 e 4) com resolução de 30x30 m.

Tempo de passagem pela célula

As células da bacia foram divididas em 'células com escoamento concentrado' e 'células com escoamento superficial' (ou não concentrado). O escoamento concentrado se dá nas células pertencentes à rede de drenagem, definida antes. A hipótese admitida é que em células pertencentes à rede, o escoamento em canal é preponderante sobre o escoamento superficial na célula. Para células não-pertencentes à rede de drenagem, onde predomina escoamento em superfície, o cálculo do tempo de deslocamento entre células é realizado através da fórmula do Soil Conservation Service (SCS, 1975):

$$tc = 3.42 \times L^{0.8} \cdot \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) - 9 \right]^{0.7} \times S^{-0.5} \tag{8}$$

onde **tc** é o tempo de concentração [min]; **L** é o comprimento de talvegue [km]; **CN** o número da curva (SCS); **S** a declividade do talvegue [m / m].

No deslocamento em canal, o tempo de translado entre células é obtido a partir da confecção de um mapa de velocidades, gerado por sua vez, através de uma relação entre a equação da continuidade e a fórmula empírica de Manning para canais de grande largura (a característica de grande largura é assumida devido a predominância da largura sobre a profundidade de escoamento, observada em bacias desta ordem de grandeza). A fórmula resultante é (Muzik, 1996).

$$V = \left[\frac{S^{0.5}}{n} \cdot \left(\frac{Q}{B} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{0.6} \tag{9}$$

onde **V** é a velocidade em canal [m / s]; **S** a declividade do canal [m / m]; **n** a rugosidade de Manning; **B** a largura do canal [m]; **Q** a vazão do canal [m^3 / s].

A equação de Manning tem aplicação exclusiva no caso de movimento permanente, onde o fundo do canal e a linha d'água são paralelos. Mas, na transformação de chuva para vazão, o movimento não é permanente, ou seja, não é possível utilizar a declividade do fundo, que pode ser, inclusive, nula. Portanto, é preciso estimar a declividade da linha d'água. Esta estimativa foi feita aplicando a metodologia apresentada por Santana et al. (1997).

Adotando a hipótese de uma chuva efetiva unitária, uniformemente distribuída sobre a bacia, a vazão que atravessa cada célula corresponde a sua área contribuinte. Esta foi denominada de "vazão de referência". Com isto, as vazões em canais entre células devem apresentar um valor intermediário representativo, obtido pela média aritmética das vazões de referência (Santana et al., 1997).

Os tempos de deslocamento por célula, nas células com escoamento concentrado (redes de canais), foram calculados pela relação :

$$\text{Tempo} = \frac{\text{Espaço}}{\text{Velocidade}} \tag{10}$$

onde **Espaço** representa a aresta ou a diagonal da célula.

Para as células não pertencentes à rede de canais, o tempo de deslocamento por célula foi calculado utilizando a equação (7).

Tempo de viagem da célula até a saída da bacia

O tempo de passagem pelas células foi acumulado, segundo a direção de fluxo, de forma semelhante ao processo de obtenção da área acumulada, resultando nos tempos de deslocamento da água da célula considerada até a saída da bacia. O resultado desta operação foi um mapa de tempos de viagem de uma precipitação unitária até a saída da bacia, que é a base para a obtenção do mapa de isócronas (figura 7).

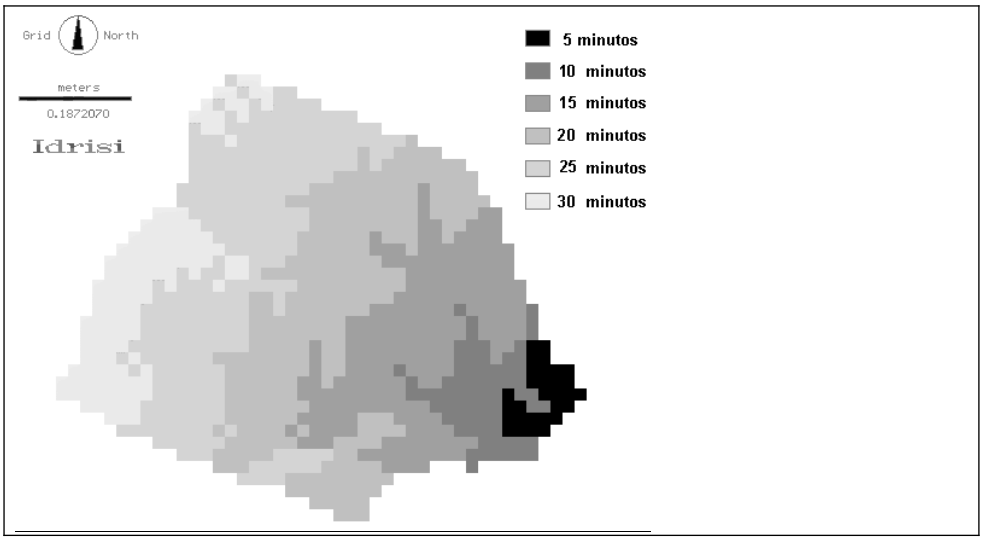


Figura 7: Mapa de tempo de viagem até a saída da bacia do Donato.

Histograma tempo área

A obtenção do histograma de freqüências de uma imagem ou mapa é uma operação simples em um SIG. O histograma de freqüencias do mapa de tempo de viagem até a saída da bacia é o histograma tempo área. Considerando uma precipitação efetiva unitária, igual em toda a bacia, pode ser obtido do histograma tempo área o hidrograma unitário. O intervalo de tempo de 5 min foi escolhido de forma a descrever bem a forma deste hidrograma (figura 8).

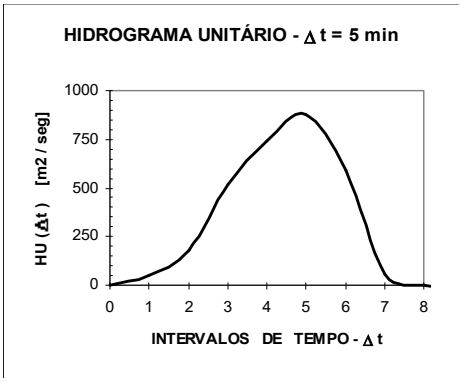


Figura 8: Hidrograma unitário da bacia do Donato.

Índice de saturação

O índice de saturação, proposto por Beven e Kirkby (1979), não é utilizado neste trabalho, mas é apresentado como proposta para incrementar a metodologia. Em palavras simples, o índice de saturação mede a predisposição topográfica de uma área específica em gerar escoamento.

$$I_{sat} = \ln\left(\frac{A}{S}\right) \tag{11}$$

onde a A é *área unitária*, igual à área acumulada a montante por unidade de largura, transversal ao sentido do fluxo; S é a declividade e I_{sat} é o índice de saturação.

APLICAÇÃO

Para verificação dos resultados da aplicação do HU obtido, foram utilizados dois eventos observados na bacia do arroio Donato, às datas 29/03/96 e 21/10/97 (Chevallier, 1993), nos quais a precipitação efetiva foi discretizada em intervalos de 5 minutos com auxílio do Gerenciador de Dados GEDAC (Pedrollo,1997). O primeiro, trata-se de um evento simples, e o segundo evento apresenta-se de forma mais complexa, devido ao fenômeno de El Niño de outubro de 1997. As características dos eventos aparecem na Tabela 2, onde pode-se observar a faixa de precipitações efetivas e vazões de escoamento superficial, assim como as condições de umidade antecedente.

Nesta tabela, o **IPA 6 dias** representa o índice de umidade antecedente de 6 dias, **Qinicial** representa a vazão prévia ao evento, **Pacum**, **Qacum** e **Ia** representam a precipitação e

vazões acumuladas e as perdas iniciais, respectivamente. O **CN** é a curva número do SCS (1975) estimado a partir do evento e **Qmáx** é a vazão pico. Ambos eventos ocorreram em condições de plantio direto, sendo que o primeiro se encontra na fase final da cultura de verão (soja/milho) e o segundo na fase final da cultura de inverno (aveia/trigo). Em ambas ocasiões, a rugosidade potencial do terreno foi similar.

Tabela 2: Características dos eventos analisados

		Estado de umidade			Características do evento				
Data		IPA 6 dias (mm)	Q inicial (l/s)		P acum (mm)	Q acum efetiva (mm)	Ia (mm)	CN do evento	Qmáx Observado (l/s)
29.03.96		3,3	1,2		15,9	0,21	5,9	33	137
21.10.97		101,1	39,9		43,6	3,80	12,1	53	1756

A simulação foi feita aplicando a fórmula (6) de convolução discreta. Os hidrogramas simulados foram plotados conjuntamente com os observados para uma análise posterior.

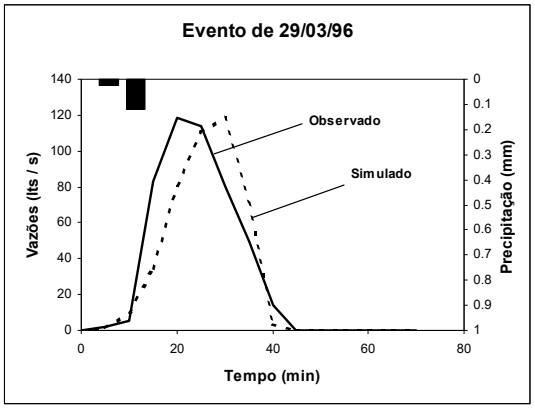


Figura 9: Escoamento superficial simulado e observado para no evento de 29/03/96.

A forma do hidrograma dos dois eventos foi muito parecida à forma do hidrograma calculado, principalmente com relação ao tempo de base. Nos dois eventos o pico do hidrograma simulado está defasado de 5 a 10 minutos. No evento complexo do dia 21/10/97 (figura 11) o hidrograma simulado reproduz bem o efeito das pequenas precipitações após o intervalo de máxima chuva.

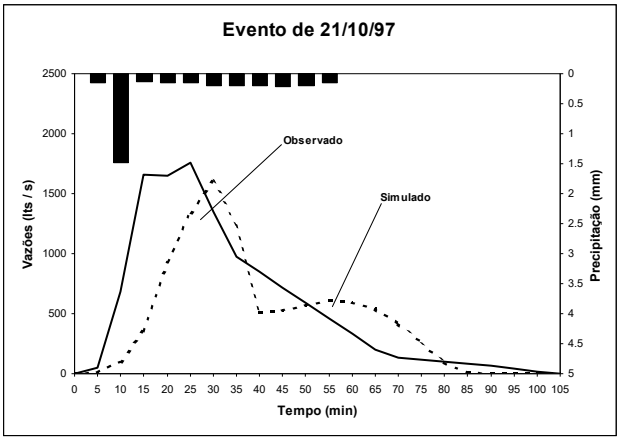


Figura 10: Escoamento superficial simulado e observado para no evento de 21/10/96.

CONCLUSÕES

Os resultados mostram que é possível obter o hidrograma unitário de uma bacia a partir do seu modelo numérico do terreno. As comparações de hidrogramas calculados a partir da lâmina efetiva de chuva, com hidrogramas observados, mostram que existe erro de atraso do pico do hidrograma calculado. O tempo de base do hidrograma, por outro lado, ficou muito próximo do valor observado.

Embora trabalhosa, a metodologia pode ser automatizada e, ao final, pode produzir estimativas de hidrogramas unitários para todos os pontos da bacia, não apenas para a sua seção de saída.

As limitações da presente metodologia surgem a partir das hipóteses iniciais. Em primeiro lugar, a obtenção das ordenadas do hidrograma unitário surgem das aplicações de técnicas simples de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A determinação do escoamento superficial e da precipitação efetiva são fundamentais e determinantes para a metodologia do HU. Estas separações são processos que têm embutidas inúmeras incertezas.

A separação do escoamento superficial segue os lineamentos básicos apontados em Linsley et al. (1982). Estas 'separações' são hoje superadas pelos critérios de “integração de componentes” e de “escoamento rápido” (Burt, 1988). A modo de recomendação os autores sugerem que estes processos de separação poderiam ser melhorados com a utilização de mapas de CN para o escoamento superficial e o mapa de 'Índice de Saturação' (equação 11) para o escoamento sub-superficial.

Devido ao fato da bacia analisada apresentar ciclos de culturas diferenciados ao longo do ano, a rugosidade, uso do solo e o estado vegetativo influenciam a dinâmica de aparição e desaparição de pequenos canais efêmeros na bacia, devido à erodibilidade do solo, erosividade das chuvas e topografia do local. A existência de uma voçoroca na rede de drenagem da bacia também pode ter influenciado os resultados, criando armazenamento, que não é contemplado no hidrograma unitário.

Algumas das propostas para futuros trabalhos se concentram em: i) o uso de metodologia com lâminas precipitadas totais ao invés de lâminas de precipitação efetiva; ii) discriminação de tempos de deslocamento da onda na escala de ‘sub-célula’, em especial naquelas que são consideradas canal, nas quais apenas uma pequena parcela pertence ao canal, enquanto o resto da célula tem um escoamento ‘em superfície’; iii) o estudo do efeito da intensidade de chuva total no histograma tempo-área e no tempo de concentração da bacia; iv) uso de pontos de controle (por exemplo sub-bacias embutidas) onde possam ser avaliadas tanto variáveis (tempos concentração, velocidades instantâneas, produção de escoamento máximo, etc.) como evidências macroscópicas de processos (níveis subterrâneos, surgimento de rede de “pipping”, desenvolvimento de “voçorocas”, etc.) e, finalmente, v) uma estimativa das incertezas dos variáveis de entrada e do modelo utilizado na obtenção do HU.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq, que financiaram este trabalho com bolsas de pesquisa. À Dra. Nilza M. Castro e ao Tec. Ricardo Gonçalves que cederam gentilmente os dados de base utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURT, T. 1988. Storm runoff generation in small catchments in relation to the flood response of large basins. In: K . Beven e P. Carling (ed.) *Floods: Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*. New York: John Wiley & Sons, p.11-35.

CHEVALLIER, P. 1993. *Projeto Potiribú: Dados básicos de pluviometría e fluviometría*. Recursos Hídricos-V.26. Porto Alegre: IPH-UFRGS.

CHOW, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, 584 p.

Christofoletti, A. 1981. *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Editora Edgar Blücher. 313 p.

COLLISCHONN, W.; Mendiondo, E.M.; Bulhões Mendes, C.A. 1998. Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 1: Princípios Gerais. *XVII Congreso Nacional del Agua / II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*.

JENSON, S., Domingue, J. 1988 Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetic Engineering. and Remote Sensing.,* v.54, n.11, p.1593-1600.

LINSLEY, R., Kohler, M., e J. Paulhus. 1982. *Hydrology for engineers*, 3ª ed. New York: Mc Graw-Hill, 350p.

MAIDMENT, D.R.1993. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. In: *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publication No. 211. U.K.: IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, p. 181-192.

MENDIONDO, E.M.; Castro, N.M.; Auzet, V.; Chevallier, P. 1998a. Padrões espaciais e temporais de caminhos preferenciais da água superficial. In*: Anais VI Simpósio Brasileiro de Controle de Erosão.* Presidente Prudente*,* SP.

MENDIONDO, E.M. ; Collischonn, W.; Bulhões Mendes, C.A. 1998b. Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 2: Obtenção de atributos. In: *XVII Congreso Nacional del Agua / II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur.*

MUZIK, I. 1996. Flood modelling with gis-derived distributed unit hydrographs. *Hydrological Processes,* v.10, p.1401-1409.

PEDROLLO, O. 1997. *GEDAC: Gerenciamento de dados contínuos. Manual do usuário*. Porto alegre: IPH - UFRGS. 59 p.

PILAR, J. V.; Cruz; M. A. S.; Mendiondo, E. M.; Santana, A. G. 1998 Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 3: obtenção do hidrograma unitário. *XVII Congreso Nacional del Agua / II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Santa Fé, Argentina.

PONCE, V. M. 1989 *Engineering hydrology – principles and practices*. Prentice Hall, New Jersey. 640 p.

SANTANA, A.G.; Freire, C.C.; Pilar, J.V.; Hansen, M.A.F.; Cruz, M.A.S. 1997. Aplicação do SIG na obtenção do hidrograma unitário a partir do histograma tempo-área. *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-Vitória, ES. Anais I*. São Paulo: ABRH, p.575-582.

SOIL CONSERVATIO SERVICE. 1975. Urban hydrology for small water sheds. Tech. rel. No.55. Washington: U.S. Dept. of Agriculture - U.S. Government Printing Office.