REDE DE DRENAGEM PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA

Adriano Rolim da Paz[1] *& Walter Collischonn*[1]

RESUMO --- Modelos hidrológicos distribuídos têm sido aplicados com diversas finalidades, com a vantagem principal de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia. A maioria dos modelos discretiza a bacia em células retangulares interconectadas. A preparação da rede de drenagem representada nesse tipo de modelagem é tratada neste artigo. Para cada conexão entre duas células, um trecho de rio deve ser associado para realizar a propagação do escoamento. Neste artigo são analisados cinco métodos para realizar tal associação, tendo como estudo de caso a bacia do rio Ijuí (RS). Os resultados ressaltam a grande variação que pode haver nos comprimentos e declividades a serem usados como entrada no modelo hidrológico conforme a forma de associação entre trechos e conexões. Comprimentos dos trechos associados a ligações entre células de aproximadamente 10 x 10 km variaram de 2 a 59 km. Um procedimento sistemático deve ser empregado para associar trechos de rio às conexões, e recomenda-se o uso do método que considera sub-trechos no interior e fora da célula de montante. Tal método apresentou maior coerência com a representação da drenagem, embora sempre ocorrerão algumas inconsistências inerentes à discretização em elementos retangulares.

ABSTRACT ---Distributed hydrologic models have been widely used for many purposes, and the main advantage of them is the representation of the spatial variability of the basin physical characteristics. Most distributed models use interconnected square-grid cells. This paper deals with preparing and representing the drainage network into such kind of models. A river reach may be related with every link between two cells for flow propagation. In this paper five methods of relating river reaches and cells' links are analyzed, considering as case study the Ijuí basin (RS). Results show how large may be the variation of the lengths and slopes of the river reaches which serve as input for hydrological models according with the method adopted for relating reaches and links. Considering cells of roughly 10 x 10 km, length of the river reaches varied between 2 and 59 km. A systematic procedure must be employed to make the relation between reaches and links, and we recommend using the method that takes into account sub-reaches located inside and outside of the upstream cell. This method represented the drainage network more coherently, although always will occur some inconsistencies which are inherently to using square-grid cells.

Palavras-chave: rede de drenagem, modelagem hidrológica distribuída, comprimento de rio.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500. Campus do Vale, Setor 5, CEP 91501-970. Porto Alegre, RS. e-mail: adrianorpaz@yahoo.com.br; collischonn@iph.ufrgs.br; tucci@iph.ufrgs.br.

1 - INTRODUÇÃO

A modelagem matemática dos processos que envolvem a transformação chuva-vazão e da propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem tem finalidades diversas, como reconstrução de séries de vazões, confronto entre disponibilidades e demandas hídricas, previsão de vazões e sistema de alerta, otimização da operação de reservatórios, simulação de mudanças climáticas, transporte de sedimentos, simulação de qualidade de água, simulação de intervenções na bacia, etc. Nesses estudos, geralmente a representação da variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica torna-se necessária, demandando pelo uso de modelos hidrológicos distribuídos.

Modelos hidrológicos do tipo distribuído são caracterizados pela representação da bacia em unidades elementares, nas quais são representados os processos de transformação chuva-vazão, infiltração, evapotranspiração, armazenamento nos compartimentos do solo e escoamento até a rede de drenagem. Variações das formulações e simplificações na parametrização de cada processo ocorrem entre os diversos modelos distribuídos referidos na literatura, mas a maioria deles utiliza uma grade retangular para a discretização da bacia. Em alguns desses modelos, a vazão resultante da geração de escoamento superficial em cada elemento ou célula é propagada para a célula de jusante ao longo da rede de drenagem. Em bacias de grande escala, a propagação do escoamento resultante de cada elemento ao longo da rede de drenagem pode ser o fator dominante da forma e tempo de deslocamento do hidrograma de saída (Ma e Fukushima, 2002).

A interconexão entre as células da malha retangular representa esquematicamente a rede de drenagem, indicando para uma determinada célula quais células de montante contribuem para ela e qual a célula de jusante que vai receber sua contribuição. A determinação das direções de fluxo a partir do Modelo Numérico do Terreno (MNT) estabelece a interconexão entre as células (Jenson e Domingue, 1988). Diversos métodos são apresentados na literatura, tanto para a determinação das direções de fluxo na mesma escala (ou resolução) do MNT quanto para uma resolução menor (Shaw *et al*., 2005; Reed, 2003; Paz *et al*., 2006; Wang *et al*., 2000; O'Donnell *et al*., 1999).

A contribuição de uma célula para a de jusante pode ser considerada de forma direta ou propagada ao longo de um trecho de rio da célula de montante até a célula de jusante. A segunda abordagem é mais comum, e métodos diversos podem ser empregados para a propagação do escoamento, como onda cinemática, Muskingum-Cunge, difusivo e hidrodinâmico. Independente do método de propagação, duas informações são necessárias: o comprimento e a declividade do trecho de rio, os quais têm influência direta no tempo de descolamento do hidrograma e no deslocamento e decaimento de constituintes, no caso de simulação de qualidade de água (Singh e Frevert, 2002).

Diversos métodos foram desenvolvidos para extrair automaticamente informações úteis a partir do MNT para modelos hidrológicos, como no caso do HEC-HMS (Olivera, 2001), SWAT (Olivera *et al*., 2006), HL-RMS (Reed, 2003), TOPMODEL (Quinn *et al*., 1991) e outros (Turcotte *et al*., 2001; O'Donnell *et al*., 1999). Entretanto, quando se trata de modelos hidrológicos discretizados em uma grade retangular, a questão de como preparar e extrair comprimentos e declividades dos trechos de rio para propagação do escoamento entre elementos não é abordada na literatura (Paz e Collischonn, 2007). É de se supor que algum procedimento simplificado seja comumente aplicado, tal como a adoção de valores constantes ou de estimativas grosseiras baseadas em levantamentos de cartas topográficas, mas sem critérios claramente estabelecidos.

Ao aplicar um modelo hidrológico, é importante a representação adequada não só do caminho de escoamento que uma partícula de água segue após precipitar sobre qualquer ponto da bacia, mas também das variações espaciais e temporais da velocidade (ou tempo) de deslocamento ao longo de sua trajetória até o exutório da bacia (Quinn *et al*., 1991). Nesse sentido, erros ou incoerências na rede de drenagem (tanto na direção de fluxo quanto nos comprimentos e declividades dos trechos de rio) podem prejudicar o ajuste da resposta do modelo ou fazer com que esse ajuste seja alcançado pela compensação dos valores de parâmetros relativos a outros processos representados, como infiltração, armazenamento no solo, etc.

A questão chave na determinação da rede de drenagem para a modelagem hidrológica distribuída reside em como decidir qual trecho de rio associar à ligação entre duas determinadas células. O comprimento e a declividade correspondentes podem ser então extraídos com base em cartas topográficas ou como produtos derivados do MNT, inclusive por meio de procedimentos automatizados. Este artigo apresenta diferentes formas de estabelecer a rede de drenagem para a modelagem hidrológica distribuída com elementos retangulares. O foco principal constitui a comparação entre si dos resultados proporcionados pelos métodos apresentados, com o objetivo de ressaltar o quanto podem variar os valores de comprimento e declividade conforme a escolha do método. Toma-se como estudo de caso a bacia do rio Ijuí, afluente da margem esquerda do rio Uruguai e que tem uma área de drenagem de aproximadamente 10730 km^2.

2 – DISCRETIZAÇÃO EM MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUÍDOS

2.1 – Formas de discretização

Modelos hidrológicos do tipo distribuído se caracterizam por discretizar a bacia em unidades elementares onde são representados processos como interceptação, infiltração, evapotranspiração, armazenamento superficial, sub-superficial e subterrâneo. O escoamento resultante de elemento é então propagado para jusante ao longo da rede de drenagem. Duas formas principais de

discretização podem ser adotadas (Dehotin e Braud, 2007): grade retangular (Figura 1-a) ou divisão em sub-bacias (Figura 1-b). O uso de uma grade retangular permite maior facilidade de integração com planos de informação diversos, como uso e tipo de solos em formato raster, e principalmente o acoplamento com modelos de circulação atmosférica, os quais também são discretizados em elementos retangulares. Exemplos de modelos com esse tipo de discretização são os modelos WATFLOOD (Kouwen e Mousavi, 2002), SHE (Refsgaard e Storm, 1995) e VIC-2L (Liang *et al*. 1994).

A discretização em sub-bacias, referenciada geralmente pela expressão *Representative Elementary Watersheds* (REW), tem a vantagem inerente da garantia de que todo o escoamento gerado em um elemento drena unicamente para o elemento de jusante. Esse tipo de discretização é adotado, por exemplo, nos modelos LASCAM (Sivapalan *et al*., 2002) e ARNO (Todini, 2002). A discretização em grade retangular assume como válida a regra de que toda a área de um elemento drena para o elemento de jusante, embora algumas parcelas da área do elemento possam na verdade drenar para um elemento distinto daquele conectado a jusante. Uma abordagem intermediária é utilizada pelo modelo CEQUEAU (Morin, 2002), a qual consiste em dividir cada elemento retangular em sub-regiões que drenam cada uma para um elemento vizinho distinto (Figura 1-c).

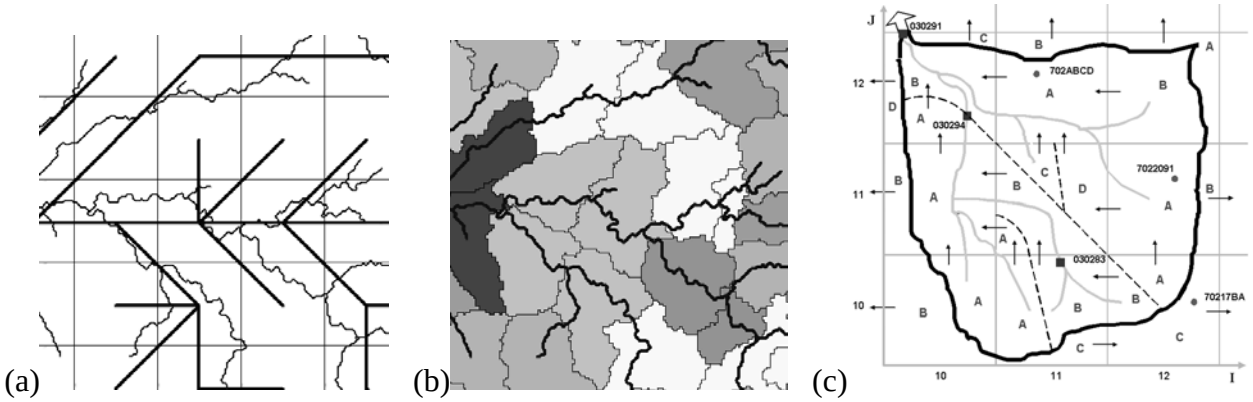

Figura 1 – Discretização de um modelo hidrológico distribuído em: (a) elementos retangulares; (b) em sub-bacias; e (c) abordagem intermediária adotada por Morin (2002).

O foco deste artigo são os modelos hidrológicos discretizados em uma grade retangular. As formulações matemáticas e abordagens de representação dos diversos processos hidrológicos variam entre os modelos, sendo resultante do objetivo principal de representação e do tipo de região para os quais foram propostos (Singh e Frevert, 2006). A despeito dessas diferenças, usualmente se requer a caracterização da rede de drenagem enxergada pelo modelo, ou seja, a conexão entre as células (para qual célula vizinha uma determinada célula drena) e as características do trecho de rio correspondente a cada conexão (comprimento e declividade).

O modelo MGB-IPH, por exemplo, foi desenvolvido para simulação de grandes bacias e possui diversos módulos para representar processos hidrológicos internos às células, como evapotranspiração, interceptação, balanço hídrico no solo, etc (Collischonn *et al*., 2007; Collischonn

e Tucci, 2001). Três reservatórios lineares simples são utilizados para armazenar e simular os escoamentos superficial (Qsup), sub-superficial (Qsub) e subterrâneo (Qbas) internamente às células. As vazões de saída dos reservatórios de cada célula atingem a rede de drenagem e são propagadas pelo método de Muskingun-Cunge ao longo de um determinado trecho de rio até a célula de jusante (Figura 2).

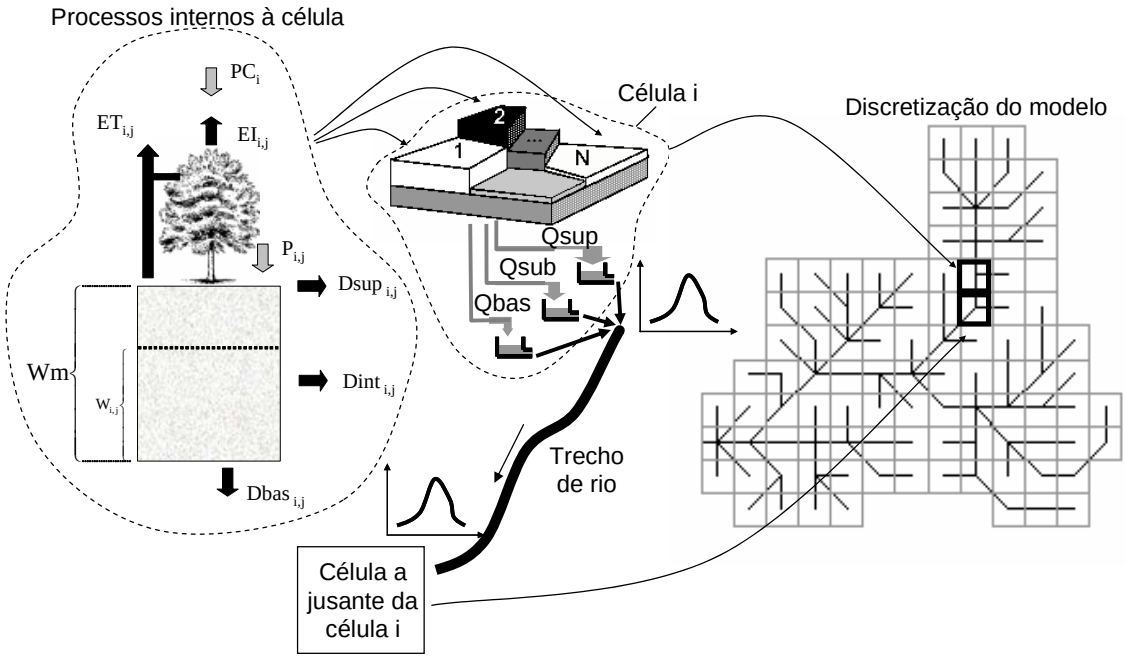

Figura 2 – Esquema de discretização e representação dos processos hidrológicos no modelo hidrológico distribuído de grandes bacias MGB-IPH.

2.2 A questão das duas escalas

Ao se assumir que existe um trecho de rio associado à ligação entre duas células, implicitamente está se trabalhando com duas escalas: na escala maior, estão os elementos da malha quadrada (células) interconectados, enquanto a escala menor se refere aos processos internos às células e onde estão representados os trechos de rio (Figura 3). Na modelagem de grandes bacias, as duas escalas são decorrentes da diferença entre o detalhamento espacial das informações disponíveis (MNT, tipo e uso da terra, etc) e a dimensão dos elementos discretizados no modelo. Por exemplo, enquanto existem MNT's no formato de imagens raster com resolução espacial de 90 m disponíveis gratuitamente (CGIAR-CSI, 2006), modelos hidrológicos de grandes bacias utilizam células com dimensões de 5 a 20 quilômetros (Colllischonn *et al*., 2007). Mesmo quando se trata de pequenas bacias e a discretização é em elementos de menores dimensões, existe uma escala ainda menor à discretização do modelo, a qual está sendo considerada caso seja adotada a propagação do escoamento ao longo de um trecho de rio entre dois elementos. Em termos de nomenclatura em ambiente raster, costuma-se empregar o termo células para os elementos da escala maior, e pixels para os elementos da escala menor, o que será adotado neste texto a partir deste ponto.

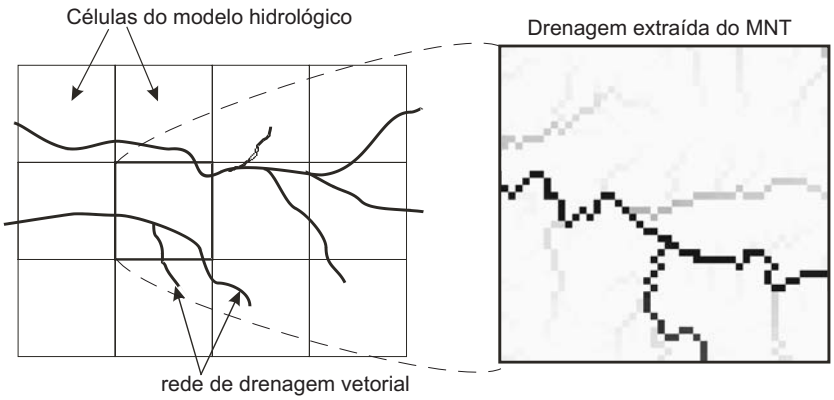

Figura 3 – Duas escalas existentes na modelagem hidrológica distribuída: células do modelo hidrológico x rede de drenagem.

3 – DETERMINAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM

3.1 Direções de fluxo

A definição das conexões entre as células do modelo hidrológico corresponde à determinação das direções de fluxo. A abordagem mais comum é que cada célula possua uma única direção de fluxo, ou seja, que cada célula drene exclusivamente para uma célula a jusante (Shaw *et al*., 2005; O'Donnell *et al*., 1999; Wang *et al*., 2000). Outros estudos adotaram direções de fluxo múltiplas, como Quinn *et al*. (1991), por exemplo. Neste estudo foi adotada a consideração de uma direção única para cada célula, a qual é estabelecida com base nas direções de fluxo e áreas de drenagem acumuladas determinadas em uma resolução maior (pixels), como descrito a seguir.

3.1.1 *Direções de fluxo na resolução do MNT*

O procedimento de determinação das direções de fluxo a partir do MNT consiste em aplicar algoritmos como o denominado D8 (*deterministic eigth-neighbours*), na sua forma original (Jenson e Domingue, 1988) ou com alguma das várias modificações propostas na literatura (Fairfield e Leymarie, 1991; Tribe, 1992; Garbrecht e Martz, 1997; Martz e Garbrecht, 1999; Soille e Colombo, 2003; Zhu *et al*., 2006). Basicamente, no método D8 a direção de fluxo de um pixel é definida na direção do pixel vizinho que proporcione a maior declividade, tomada como o quociente entre a diferença de cota e a distância entre os pixels (Figura 4-a). Uma das falhas do método D8 apontadas por alguns autores, como Fairfield e Leymarie (1991), é a tendência à geração de excessivas linhas de drenagem paralelas. Os referidos autores propuseram a introdução de uma aleatoriedade na geração de direções de fluxo em áreas planas e satisfatoriamente conseguiram evitar as drenagens paralelas excessivas.

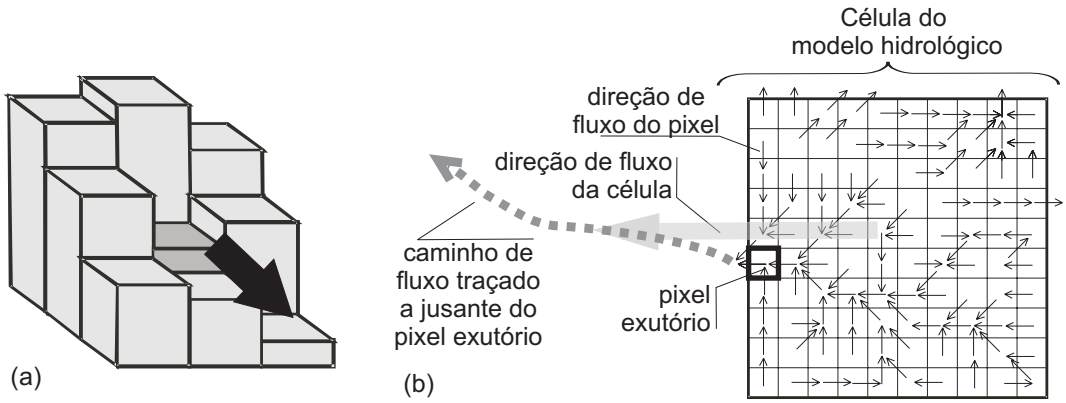

Figura 4 – (a) Atribuição de direção de fluxo de um pixel com base na regra da maior declividade; (b) Procedimento de busca de direção de fluxo de uma célula a partir das direções de fluxo dos pixels.

A despeito do desenvolvimento e evolução dos algoritmos de geração de direções de fluxo, há a limitação da capacidade do MNT em adequadamente conseguir representar a topografia de regiões planas relativamente às resoluções espacial e vertical do MNT (Walker e Willgoose, 1999), bem como problemas derivados da incapacidade do sistema sensor utilizado em ultrapassar áreas florestadas até a superfície do terreno (Valeriano *et al*., 2006). Quando existe uma rede de drenagem vetorial disponível, o procedimento de *stream burning* tem sido aplicado para a modificação do MNT, de modo que a drenagem extraída fique em conformidade com a rede vetorial existente (Mayorga *et al*., 2005; Kenny e Matthews, 2005; Saunders, 1999). O procedimento mais simples de *stream burning* consiste basicamente em imprimir a rede vetorial existente no MNT, rebaixando o valor da elevação do terreno nos pixels ao longo dessa rede.

3.1.2 *Área acumulada de drenagem para cada pixel*

As áreas de drenagem acumuladas dos pixels são determinadas com base exclusivamente nas direções de fluxo. Cada pixel recebe o valor correspondente ao somatório das áreas de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel analisado (Jenson e Domingue, 1988). Ao lidar com grandes bacias, convém considerar a área de cada pixel como função da sua posição geográfica, fazendo-se a devida projeção das coordenadas dos seus vértices.

3.1.3 *Upscaling de direções de fluxo*

Considerando a discretização adotada no modelo hidrológico em uma resolução bem menor do que a do MNT disponível (por exemplo, células de 5 km x 5 km e MNT de resolução 100 m x 100 m), o procedimento mais adequado para determinar as direções de fluxo das células é o que se denomina de *upscaling*. Trata-se de determinar as direções de fluxo na resolução do MNT e a partir desse plano de informação determinar as direções de fluxo das células do modelo hidrológico. Diversos métodos são propostos na literatura, sendo que a maioria deles tem como um dos passos

principais a determinação de um pixel exutório para cada célula, como os métodos propostos por Paz *et al*. (2006), Reed (2003), O'Donnell *et al*. (2002) e Wang *et al*. (2000). Neste estudo, foi utilizado o algoritmo apresentado em Paz *et al*. (2006; 2005), que é uma modificação do proposto por Reed (2003) e o qual é brevemente introduzido a seguir.

Seja uma célula do modelo hidrológico composta por uma certa quantidade de pixels cujas direções de fluxo foram derivadas diretamente do MNT (Figura 4-b). Dentre todos os pixels contidos na célula, o pixel exutório é tomado como aquele pixel pelo qual sai da célula o curso d'água de maior área de drenagem, com a exigência adicional de que o comprimento desse curso d'água no interior da célula seja superior a um comprimento mínimo pré-estabelecido (parâmetro do algoritmo). Após todas as células terem seu pixel exutório escolhido, a etapa seguinte consiste em, para cada célula, seguir o caminho de fluxo a jusante do seu pixel exutório e, com base no caminho traçado, definir para qual célula vizinha a célula analisada drena. A definição da direção de fluxo da célula obedece algumas regras, sendo a principal delas a verificação do incremento da área de drenagem ao longo do caminho de fluxo traçado.

3.2 Trechos de rio associados à ligação entre células

A direção de fluxo de uma determinada célula estabelece qual célula vizinha recebe a contribuição do escoamento da célula em questão, mas nada infere sobre qual trecho de rio, na escala menor de trabalho, está associado à ligação entre tais células. Ampla revisão bibliográfica foi realizada e nenhuma proposta de procedimento ou regra de associar trechos de rio às ligações entre as células foi encontrado, à exceção do algoritmo proposto pelos próprios autores (Paz e Collischonn, 2007).

O exemplo de rede de drenagem da Figura 5 ilustra como a associação de trechos de rio às ligações entre células não é uma tarefa trivial. Por exemplo, em termos da drenagem de macro-escala, a célula B1 recebe contribuição da A1 e contribui para a célula C2. Qual trecho de rio deveria ser associado à ligação B1-C2? Um passo inicial pode ser identificar qual dos rios que atravessa a célula B1 diz respeito à ligação em questão – o rio que atravessa a célula B1 nos pontos a e b seria então escolhido. Para selecionar qual trecho específico desse rio associar à ligação B1-C2, uma idéia razoável poderia ser tomar a parcela do rio localizada dentro da célula a partir da qual se faz a propagação, ou seja, o trecho a-b localizado dentro da célula B1. Mas o escoamento que segue da célula B1 só atinge a célula de destino (C2) a partir do ponto "e" do rio, de forma que o trecho b-e poderia ser incluído no trecho de rio associado à ligação entre as células B1 e C2.

Observando todas as células da Figura 5, tem-se um panorama da complexidade de situações que surgem e que levam a crer, já de antemão, que nenhuma regra de associação dos trechos de rio a ligações entre células proporcionará resultados totalmente coerentes. Sempre haverá casos em que

qualquer que seja o trecho de rio escolhido, ele não estará de acordo fisicamente com o percurso que segue o escoamento representado. Tome-se, por exemplo, a célula C3 que drena para a célula D3. A contribuição que a célula C3 recebe das células de montante faz dois percursos distintos no interior dessa célula (trechos f-g e h-g), além de que parte do escoamento gerado na própria célula C3 na verdade drena para o trecho i-j. Qualquer trecho escolhido para representar a ligação C3-D3 tem uma simplificação razoável admitida.

A não garantia de total coerência quando da associação entre trechos de rio e ligações entre células do modelo hidrológico é inerente à discretização do modelo em uma grade retangular. Contudo, algum procedimento sistematizado deve ser adotado, de forma a que os trechos de rios sejam associados da forma mais coerente possível do ponto de vista hidrológico. Critérios como continuidade e não duplicidade podem ser tomados como regras básicas interessantes. O critério de continuidade se refere à contabilização dos percursos completos dos rios, isto é, o agrupamento de todos os trechos associados às ligações entre células referentes a um mesmo rio deve equivaler ao rio completo. O critério de não duplicidade denota que nenhuma parte dos rios deve ser associada a duas ou mais ligações entre células – cada ligação entre células tem seu trecho exclusivo. Entende-se que tanto a omissão como a duplicidade de algum trecho de rio estaria incorrendo em uma falha conceitual na representação da drenagem representada no modelo hidrológico.

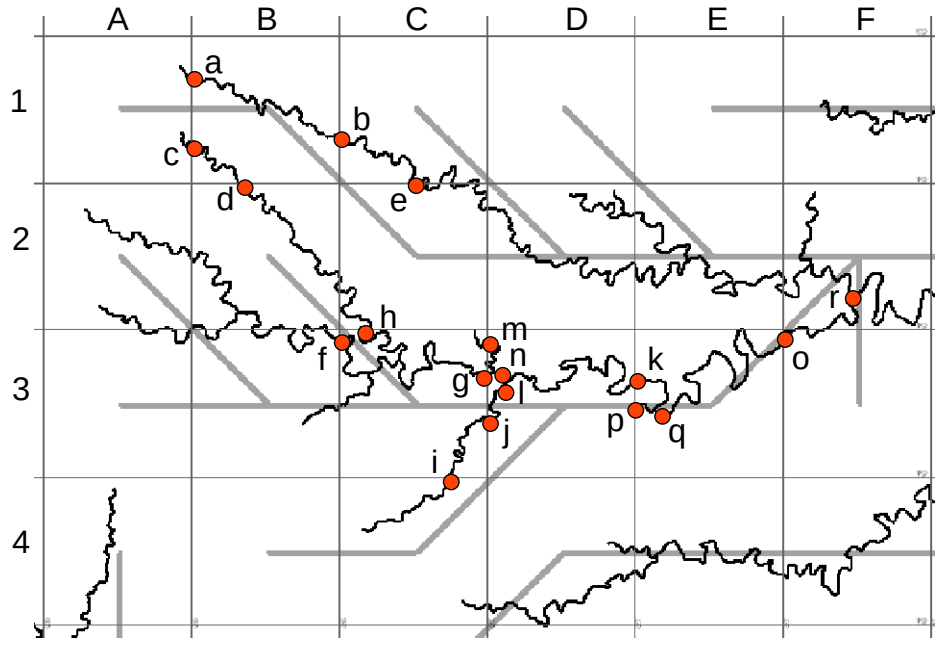

Figura 5 – Exemplo de uma rede de drenagem associada às células de um modelo hidrológico distribuído (ver Tabela 1).

As formas de associação dos trechos de rio às ligações entre células abordadas neste estudo são as apresentadas na Tabela 1. Os quatro primeiros métodos foram escolhidos por serem soluções que se supõe que possam estar sendo utilizadas correntemente, enquanto o quinto método consiste

do algoritmo proposto em Paz e Collischonn (2007). Para ilustrar cada um dos métodos, são apresentados os trechos associados às ligações entre as células B1-D2, D3-E3 e E3-F3 da Figura 5 (Tabela 1).

Tabela 1 – Trechos de rio associados a algumas ligações entre células da rede de drenagem exemplificada na Figura 5.

Método	Ligação B1-C2	Ligação D3-E3	Ligação E3-F3
1 Ligação geométrica	Diagonal	Ortogonal	Diagonal
2 Maior trecho de rio	a-b	j-l-k	k-o
3 Trecho de rio principal	a-b	g-l-k	k-o
4 Soma dos trechos de rio	a-b + c-d	g-l-k + j-l + m-n	k-o + p-q
5 Sub-trechos de montante e jusante	a-b-e	g-l-k	k-o-r

O método 1 consiste em, grosseiramente, adotar como trecho de rio a linha imaginária que estabelece a conexão entre as células, de forma que uma ligação ortogonal equivale a um comprimento igual ao tamanho da célula (dx), e uma ligação diagonal equivale a $\sqrt{2}$.dx. Pelo método 2, à ligação entre duas células está associado o trecho de rio de maior extensão no interior da célula de montante, não importando nenhuma outra condição. O método 3 é similar ao método 2, com a diferença que o trecho de rio escolhido dentro da célula de montante é aquele referente ao rio principal, dado como o rio de maior comprimento acumulado desde a cabeceira até a passagem através da célula. Não necessariamente o rio principal que atravessa a célula é o de maior extensão dentro dela. No método 4, todos os trechos de rio no interior da célula de montante são computados.

O método 5 emprega um algoritmo desenvolvido com base no procedimento de upscaling de direções de fluxo, e que se vale dos pixels exutórios determinados durante o upscaling como ponto principal. Toda célula tem um trecho de rio associado que pode ser composto por apenas o sub-trecho no interior da própria célula, ou por esse e por um sub-trecho fora da célula. O sub-trecho dentro da célula está localizado a montante do pixel exutório e se estende até a borda da célula. O sub-trecho fora da célula, caso exista, vai do pixel exutório para jusante até encontrar um outro trecho já associado a alguma célula. A descrição completa do algoritmo é apresentada em Paz e Collischonn (2007).

3.3 Comprimentos e declividades dos trechos de rio

Dentre os métodos de associação de trechos de rio e células apresentados na Tabela 1, apenas o método 1 não requer a determinação dos comprimentos de cada trecho, por adotar um valor constante em função apenas da geometria da ligação (ortogonal ou diagonal). Nos demais métodos, os comprimentos de rio de cada trecho podem ser determinados a partir de uma base hidrográfica vetorial ou com base na drenagem raster extraída do MNT.

Para este estudo, foi empregado um procedimento automático que se baseia na drenagem raster derivada do MNT (imagem na mesma resolução do MNT, onde os pixels pertencentes à

drenagem têm valor 1 e os demais têm valor 0). A rede de drenagem é derivada das áreas acumuladas de drenagem, com a adoção de um valor mínimo de área de contribuição para denotar o início ou formação de cada rio. A questão da definição do início da drenagem propriamente dita é alvo de diversas pesquisas (McNamara *et al*., 2006; Dade, 2001) e tem grande relevância na extração da drenagem a partir do MNT. Entretanto, essa questão escapa ao foco principal deste artigo, já que o valor adotado para tal parâmetro apresenta relativamente pouca influência sobre a discussão proposta.

Após a geração da rede drenagem em formato raster e a derivação das direções de fluxo das células através do processo de upscaling, é feita a associação entre os trechos de rio e as conexões das células. Em seguida, os comprimentos dos trechos de rio são determinados seguindo o caminho de fluxo pixel a pixel e contabilizando a distância percorrida. A forma tradicional é de computar um incremento de distância igual à dimensão do pixel, ao caminhar ortogonalmente de um pixel para o de jusante, ou igual a $\sqrt{2}$ vezes a dimensão do pixel, no caso de um passo diagonal (Burrough e McDonnel, 1998; Fairfield e Leymarie, 1991). Entretanto, De Smith (2004) ressalta que existe um erro inerente a essa forma usual de calcular distâncias ao longo de uma linha em uma imagem raster, o qual é independente da resolução da imagem e que pode alcançar 7,6%. Tal autor sugere o emprego de operadores de distâncias para o cálculo da distância incremental no percurso pixel a pixel: passo ortogonal com distância igual a [ODo x dimensão do pixel], e passo diagonal igual a [ODd x dimensão do pixel], onde ODo e ODd são os operadores de distância na ortogonal e na diagonal, respectivamente. Por exemplo, Butt e Maragos (1998) propõem como operadores de distância os valores 0,96194 e 1,36039 para um passo ortogonal e diagonal, respectivamente, que reduzem o erro para em torno de 3,2%.

Quanto às declividades de cada trecho de rio, elas podem ser determinadas tomando a diferença de elevação entre os pixels situados mais a montante e mais a jusante do trecho e dividindo pelo comprimento correspondente. Esse procedimento é diretamente aplicável no caso dos métodos 2, 3 e 5, por que tais métodos associam a cada ligação entre células um trecho de rio contínuo, cujos pixels de montante e jusante são identificados. Para os métodos 1 e 4, valores médios de elevação dos pixels das células de montante e jusante podem ser tomados para o cálculo da declividade.

4 – APLICAÇÃO À BACIA DO RIO IJUÍ

O rio Ijuí é o maior afluente da parte média do rio Uruguai, estando situado na sua margem esquerda (Figura 6). Tem comprimento estimado em 542 km, área de drenagem de 10730 km2 e largura variando entre 50 e 100 m. É um rio de sinuosidade relativamente alta, estimada em 2,72, e declividade média de 0,72 m/km.

Estudos envolvendo modelagem hidrológica distribuída foram realizados na bacia do rio Uruguai com o emprego do modelo MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007; Collischonn *et al.*, 2005). Tanto nesses estudos como nos realizados com o MGB-IPH em outras grandes bacias da América do Sul (São Francisco, Rio Grande, Madeira, Tapajós, etc), a discretização adotada foi de células de 0,1º x 0,1º (ou 10 x 10 km). Logo, essa foi a dimensão das células tomada para o estudo descrito neste artigo.

O MNT produzido a partir do levantamento do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), com resolução espacial de 0,00083º (ou ~90m), e disponibilizado gratuitamente na Internet (CGIAR-CSI, 2006) constitui o MNT de maior resolução disponível para a área da bacia do rio Uruguai. O MNT do SRTM foi reamostrado para a resolução de 0,001º (~100 m), de modo que as duas resoluções de trabalho sejam múltiplas entre si. Dentro de cada célula de 0,1º x 0,1º existe, portanto, um número constante de 10000 pixels de 0,001º x 0,001º cada.

Para este estudo foi utilizado um algoritmo de geração de direções de fluxo semelhante ao original D8, com a inclusão de um fator de aleatoriedade como proposto por Fairfield e Leymarie (1991). O procedimento de stream burning foi aplicado para modificação do MNT, utilizando uma rede hidrográfica vetorial digitalizada a partir de imagens do satélite Landsat ETM+, apresentada na Figura 6. Na extração dos trechos de rio a partir do MNT, foi considerado o início da drenagem a partir de uma área de contribuição de 50 km2, que equivale a aproximadamente metade da área de uma célula do modelo hidrológico. Trechos de rio foram associados a cada ligação entre células, exceto na ligação de células de cabeceira, que são aquelas que não recebem contribuição de outra célula. Para células de cabeceira, não foram associados trechos de rios por duas razões. O primeiro motivo é que, na formulação atual do modelo hidrológico MGB-IPH, células de cabeceira contribuem diretamente para a célula de jusante, sem propagação ao longo de um trecho de rio. O segundo motivo é para excluir ou pelo menos minimizar a influência da questão de onde se inicia a drenagem propriamente dita.

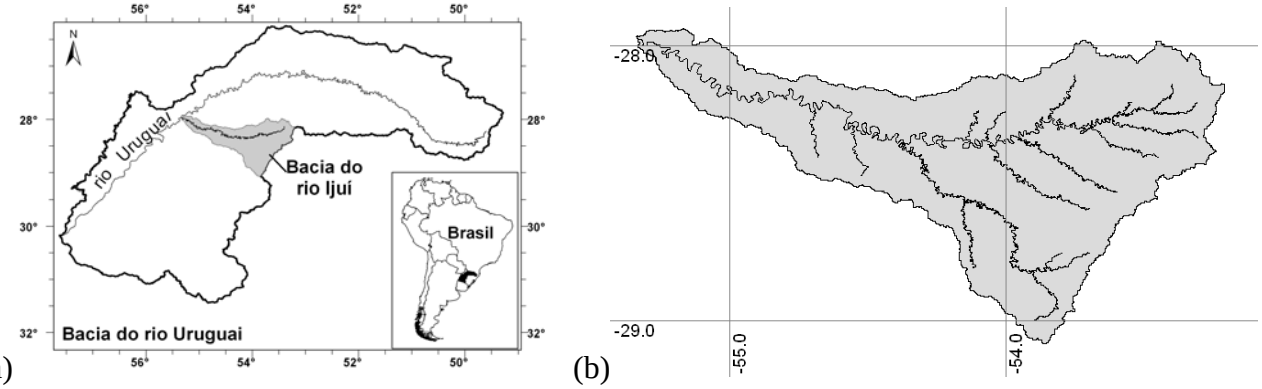

Figura 6 – (a) Localização da bacia do rio Ijuí; (b) Bacia do rio Ijuí com rede de drenagem digitalizada a partir de imagens de satélite.

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discretização da bacia do rio Ijuí em células de 0,1º x 0,1º é apresentada na Figura 7, onde também são apresentadas as ligações entre células (traços retos grossos) e a rede drenagem extraída do MNT e transformada para forma vetorial (linha fina). A conexão entre as células foi obtida automaticamente pelo algoritmo de upscaling de direções de fluxo, e nenhuma correção manual foi realizada. Ao todo, a bacia foi discretizada em 98 células, sendo 45 delas de cabeceira. Para as demais 53 células, foram associados trechos de rio segundo cada um dos 5 métodos da Tabela 1.

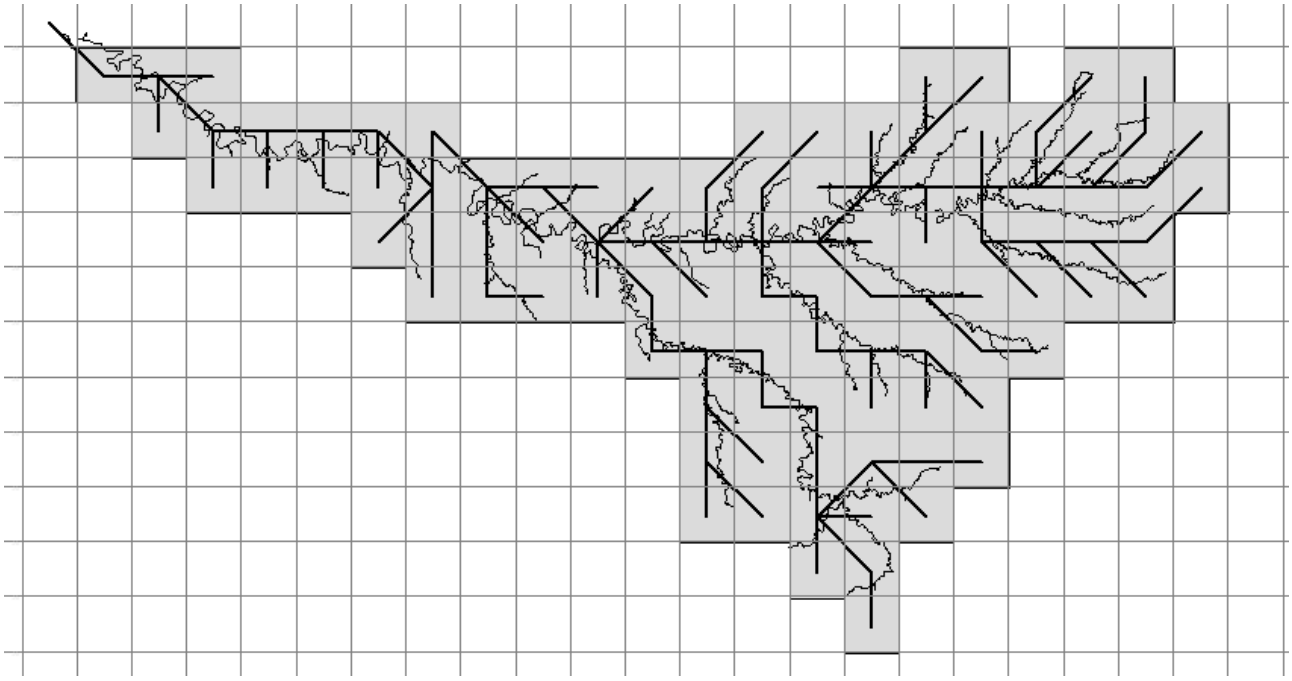

Figura 7 – Discretização da bacia do rio Ijuí em células de 0,1º x 0,1º, com indicação da conexão entre células (traços grossos retos) e da rede de drenagem extraída do MNT (linha fina).

Os valores médios, máximos e mínimos dos trechos de rio referentes a cada método são apresentados na Tabela 2. O método 1 adota valores fixos iguais à dimensão da célula ou à diagonal traçada entre duas células e, portanto, os trechos de rio apresentam valores iguais a 10 ou 14,1 km, correspondendo a um valor médio por ligação de 11,0 km, em função do número de trechos ortogonais e diagonais. Todos os demais métodos apresentam valores bem distintos desse método 1, com valores médios entre 15,5 e 24,8 km, o que representa em torno de 1,4 a 2,3 vezes o valor fixo com base na geometria da conexão. A faixa de variação dos comprimentos nos métodos 2 a 5 é ampla, indo de próximo de 2 km a quase 60 km. Ou seja, uma variação de quase 50 km, ou 5 vezes o tamanho de uma célula, entre os comprimentos dos trechos de rio associados às conexões entre células.

Tabela 2 – Valores médio, mínimo e máximo dos comprimentos dos trechos de rio para os diferentes métodos de associação com as ligações entre células.

Método	Lmédio (km)	Lmin (km)	Lmax (km)
1 Ligação geométrica	11,0	10,0	14,1
2 Maior trecho de rio	17,2	3,0	46,4
3 Trecho de rio principal	15,5	1,9	31,0
4 Soma dos trechos de rio	24,8	5,4	58,7
5 Sub-trechos de montante e jusante	24,0	1,8	55,1

Os histogramas apresentados na Figura 8 ressaltam ainda mais a ampla faixa de variação dos comprimentos dos trechos de rio. Novamente destaca-se que, nos quatro métodos (2 a 5), a quantidade de trechos com comprimentos superiores ao tamanho da ligação geométrica foram bastante elevados. Com comprimento superior a 15 km estão 32% dos trechos obtidos no método 2, 31% dos trechos do método 3, 66% dos trechos do método 4 e 60% do método 5.

Os métodos 2 (escolha do maior rio dentro da célula de montante) e 3 (escolha do rio principal) resultaram na associação de trechos de rio semelhantes entre si, indicando que na maioria das vezes o rio que tem a maior extensão no interior de uma célula é também o rio principal que a atravessa. Os histogramas dos comprimentos dos trechos de rio correspondentes a esses métodos são parecidos, indicando uma maior ocorrência de comprimentos variando entre 10 e 25 km, faixa onde estão 70% dos trechos do método 2 e 68% dos trechos do método 3.

O método que considera o somatório dos trechos contidos no interior da célula de montante (método 4) e o método dos sub-trechos de montante e jusante (método 5) resultaram em histogramas de forma mais distribuída em relação aos métodos 2 e 3, e também em maiores comprimentos dos trechos de rio. No método 4, a faixa de ocorrência mais freqüente dos comprimentos foi entre 20 e 25 km, com 26,4% dos trechos, enquanto no método 5 a faixa entre 15 e 20 km teve 20,8% dos trechos. Nos métodos do maior rio (método 2) e do rio principal (método 3), os trechos de rio atribuídos à ligação entre células apresentaram menores comprimentos do que nos métodos 4 e 5. Por exemplo, o percentual de trechos acima de 30 km foi de 4% e 2% nos métodos 2 e 3, respectivamente, enquanto nos métodos 4 e 5 esse valor foi de 28% e 26%, respectivamente.

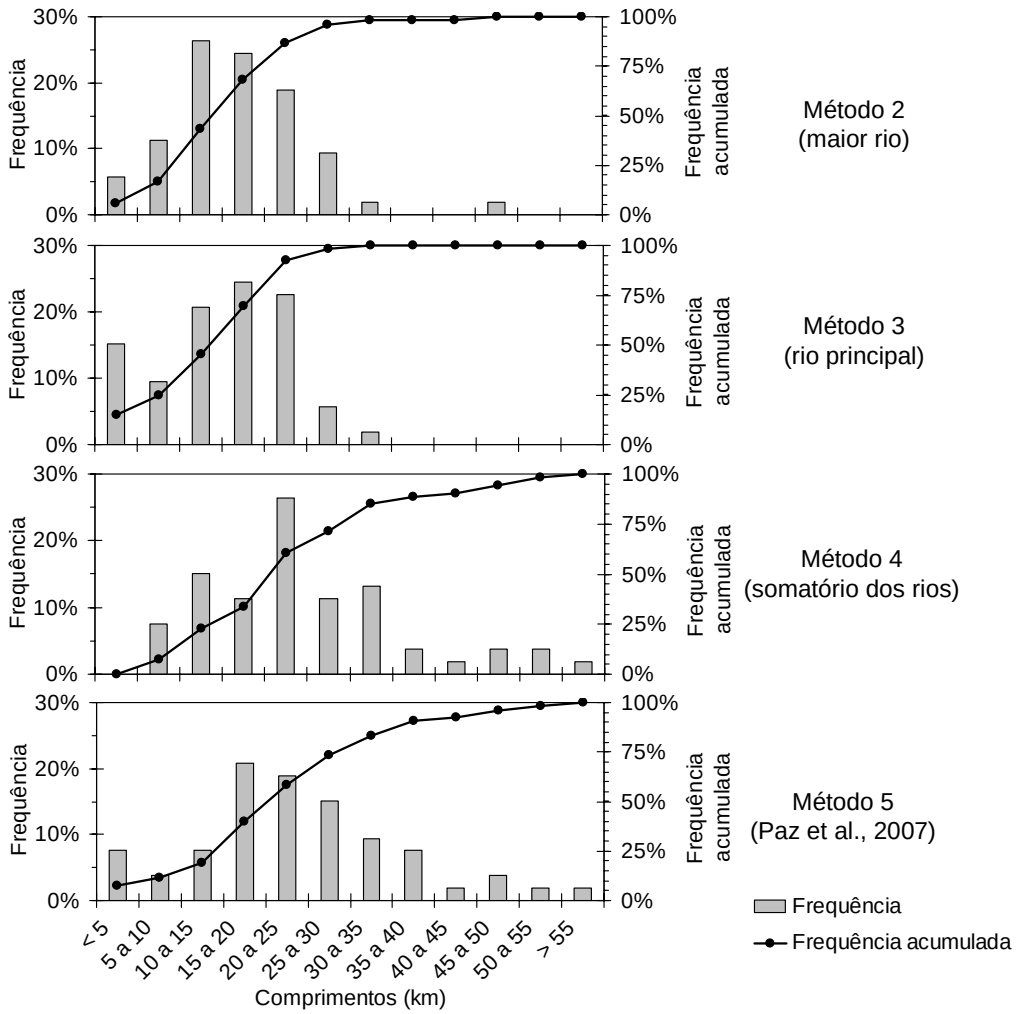

Figura 8 – Histogramas dos comprimentos dos trechos de rio associados às células do modelo hidrológico na bacia do rio Ijuí, referentes aos métodos 2 a 5.

Por contabilizar todos os trechos de rio situados dentro da célula, incluindo o rio de maior extensão e o principal, era esperado que o método 4 apresentasse trechos de rio com comprimentos bem superiores aos métodos 2 e 3. No método 5, contudo, o valor elevado dos comprimentos dos trechos de rio merece mais destaque. Esse método procura atribuir à ligação entre duas células um trecho de rio que represente fisicamente essa ligação, podendo incluir além do sub-trecho localizado dentro da célula de montante (como os métodos 2 e 3), um sub-trecho localizado fora da célula de montante. Em geral, portanto, o acréscimo do comprimento dos trechos de rio determinados no método 5 em relação aos métodos 2 e 3 é referente aos sub-trechos situados fora da célula de montante.

No método 5, os sub-trechos situados fora da célula de montante constituem a forma de garantir a continuidade física da rede de drenagem atribuída às diversas células do modelo hidrológico, como comentado em Paz e Collischonn (2007). Tome-se, por exemplo, parte da bacia do rio Ijuí apresentada na Figura 9, onde constam a rede de drenagem total extraída do MNT (Figura 9-a) e a indicação da conexão entre as células (Figura 9-b). Nas Figuras 9-c e 9-d são

traçados apenas os trechos de rio associados a alguma conexão entre células segundo os métodos 3 e 5, respectivamente. Observa-se que alguns trechos da rede de drenagem não foram considerados para formar a drenagem associada às células do modelo hidrológico segundo o método 3, como indicam as setas na Figura 9-c. A maior parte dos trechos omissos no método 3 decorre das confluências ou do fato de dois rios passarem por uma mesma célula. No caso das confluências, quando um rio se junta a outro de maior porte no interior de uma determinada célula, apenas o trecho correspondente ao rio de maior porte é contabilizado no método 3, ficando omisso o trecho do afluente (seta 1, por exemplo). Por outro lado, através do método 5, todos os rios principais ficam completamente associados a alguma conexão entre células, formando uma rede de drenagem contínua. A omissão de pequenos rios secundários e dos trechos de rio referentes às conexões a partir de células de cabeceira é a única diferença entre a rede de drenagem derivada do método 5 (Figura 9-d) e a rede de drenagem completa (Figura 9-a).

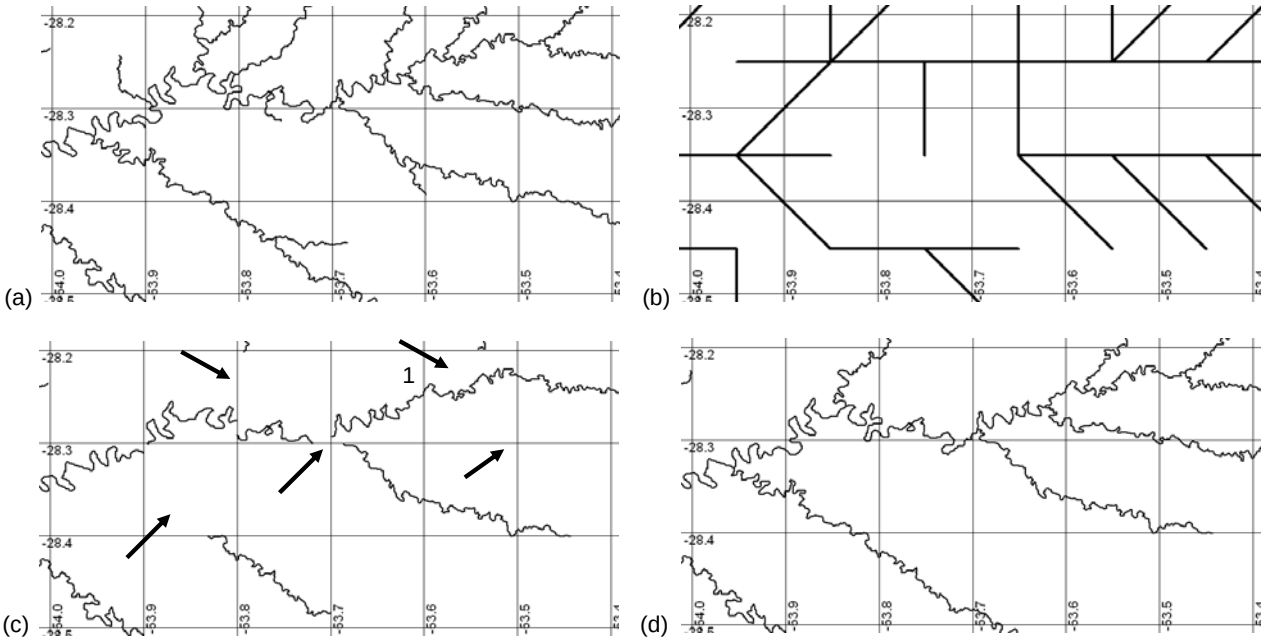

Figura 9 – Parte da bacia do rio Ijuí discretizada em células de 0,1º x 0,1º, com: (a) rede de drenagem extraída do MNT; (b) conexão entre as células; (c) trechos de rio associados às conexões entre células segundo o método 3 (rio principal); (d) trechos de rio associados às conexões entre células segundo o método 5 (sub-trechos de montante e jusante). Setas indicadas em (c) indicam trechos omissos em relação à rede de drenagem (a).

O exemplo da Figura 9 mostra que o método 3 de associação entre trechos e conexões não preserva a continuidade da rede de drenagem. Pode-se deduzir que também o método 2 não atende a tal critério. Por outro lado, o método 4 garante a continuidade da drenagem, mas às custas da perda do significado físico desse conceito, já que vários sub-trechos de rios diferentes podem ser associados a uma mesma conexão entre células. O método 5, por sua vez, preserva integralmente o critério da continuidade e o seu significado. O outro critério estabelecido, de não duplicidade, é

atendido por todos os métodos, já que nenhum trecho de rio é contabilizado mais de uma vez em tais métodos.

5 – CONCLUSÕES

Para modelagem hidrológica distribuída com elementos retangulares, o estabelecimento da rede de drenagem constitui tarefa relativamente complexa, sendo constituída pelas etapas de geração das direções de fluxo, associação de trechos de rio e determinação dos comprimentos e declividades desses trechos. Enquanto para a geração de direções de fluxo existem diversos métodos publicados na literatura, a forma de como associar um trecho de rio para cada conexão entre células não é devidamente abordada. Cinco métodos foram apresentados com esse propósito, e um estudo de caso foi desenvolvido na bacia do rio Ijuí, afluente do rio Uruguai.

Diferentes formas de associar trechos de rio às conexões entre células levam a resultados muito distintos, com grandes variações nos comprimentos dos trechos correspondentes a cada método. Claramente ficou constatado que a simplificação de adotar o comprimento do trecho de rio como igual à dimensão da célula, no caso de uma conexão ortogonal, ou igual à $\sqrt{2}$ vezes a dimensão da célula no caso de uma ligação diagonal, constitui simplificação muito grosseira. Os comprimentos dos trechos de rio resultantes dos demais métodos apresentaram valores com faixa de variação bem mais ampla, indo desde cerca de 1/5 a até 5 vezes a dimensão da célula. Embora não tenham sido calculadas para o estudo de caso, as declividades determinadas a partir desses comprimentos também terão grande variação de valores entre si.

A composição de todos os trechos de rio associados a alguma conexão entre células representa efetivamente a drenagem considerada para modelagem hidrológica, já que ao longo de tais trechos serão propagadas as vazões entre células. Por isso, foi estabelecido que a composição dos trechos considerados devem reproduzir apropriadamente a drenagem, sem omissão nem duplicidade de trechos. Conforme o método adotado, tais critérios podem não ser respeitados.

O método que considera sub-trechos no interior e fora da célula de montante apresentou maior coerência na associação dos trechos do ponto de vista do aspecto físico, principalmente para o caso de confluências e quando há mais de um rio atravessando a célula. A despeito de que sempre ocorrerão algumas incoerências, o que é inerente à discretização em grade retangular, recomenda-se o uso do referido método.

Conforme o método de propagação do escoamento, um pós-tratamento das informações extraídas automaticamente pode ser requerido, como a questão de declividades muito pequenas para propagação de vazões por métodos como Muskingun-Cunge, por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Parte desta pesquisa foi financiada pela FINEP/CT-Hidro e o primeiro autor agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de Doutorado.

BIBLIOGRAFIA

BURROUGH, P.A.; MCDONNEL, R.A. (1998). *"Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics"*. Oxford University Press. Oxford.

BUTT, M.A.; MARAGOS, P. (1998). *"Optimum design of chamfer distance transforms"*. IEEE Transactions on Image Processing 7(10), pp. 1477-1484.

CGIAR-CSI (2006). *"Void-filled seamless SRTM data V1 – 2004"*, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Available at the CGIAR-CSI 90m Dabase: http://srtm.csi.cgiar.org. Accessed on august/2006.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B.; TUCCI, C. (2007). *"The MGB-IPH model for large scale rainfall runoff modeling"*. Hydrological Sciences Journal (in press).

COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. (2005). "*Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model"*. Journal of Hydrology 205, pp. 87–98.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. (2001). *"Simulação hidrológica de grandes bacias"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 6(1), pp. 95-118.

DADE, W. (2001). *"Multiple scales in river basin morphology"*. American Journal of Science 301, pp. 60-73.

DE SMITH, M. (2004). *"Distance transforms as a new tool in spatial analysis, urban planning, and GIS"*. Environment and Planning B: Planning and Design 31, pp. 85-104.

DEHOTIN, J.; BRAUD, I. (2007). *"Which spatial discretization for which distributed hydrological model?"* Hydrology and Earth System Sciences Discussions 4, pp. 777–829.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. (1991). *"Drainage networks from grid digital elevation models"*. Water Resources Research 27(5), pp. 709-717.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L.W. (1997). "*The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models*". Journal of Hydrology 193, pp. 204-213.

JENSON, S.K.; DOMINGUE, J.O. (1988). "*Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(11), pp. 1593-1600.

KENNY, F.; MATTHEWS, B. (2005). *"A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology*". Computers and Geosciences 31, pp. 768-779.

KOUWEN, N.; MOUSAVI, S. (2002). *"Watflood/SPL9: hydrological model & flood forecasting system"*, in *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Ed. por Singh, V. e Frevert, D., Water Resources Publications, Colorado, EUA, pp. 649-686.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F.; BURGES, S.J. (1994). *"A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models"*. Journal of Geophysical Research 99(7), pp. 14415-14428.

MA, X.; FUKUSHIMA, Y. (2002). *"Numerical model of river flow formation from small to large scale river basin*", in *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Ed. por Singh, V. e Frevert, D., Water Resources Publications, Colorado, EUA, pp. 433-470.

MARTZ, L.W.; GARBRECHT, J. (1999). *"An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM*". Computers and Geosciences 25, pp. 835-844.

MAYORGA, E.; LOGSDONA, M.G.; BALLESTERB, M.R.; RICHEYA, J.E. (2005). "*Estimating cell-to-cell land surface drainage paths from digital channel networks, with an application to the Amazon basin"*. Journal of Hydrology 315, pp. 167-182.

MCNAMARA, J.; ZIEGLER, A.; WOOD, S.; VOGLER, J. (2006). *"Channel head locations with*

respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand". Forest Ecology and Management 224, pp. 147-156.
MORIN, G. (2002). *"CEQUEAU Hydrological Model", in Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Ed. por Singh, V. e Frevert, D., Water Resource Publications, Colorado, EUA, pp. 507-576.
O'DONNELL, G.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P. (1999). *"A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models"*. Hydrological Processes 13, pp. 1269-1275.
OLIVERA, F. (2001). *"Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modeling*". Journal of Hydrologic Engineering 6(6), pp. 524-530.
OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H.; KOKA, S.; AGRAWAL, A. (2006). *"ArcGIS-SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT"*. Journal of the American Water Resources Association 42(2), pp. 295-309.
PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. (2007). *"River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on relatively high-resolution digital elevation model"*, Computers and Geosciences (submetido).
PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A.L.L. (2006). *"Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models"*. Water Resources Research 42, W08502.
PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. (2005). *"Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala"*, in Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, João Pessoa (PB), Nov. 2005.
QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. (1991). *"The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models"*. Hydrological Processes 5, pp. 59-79.
REED, S.M. (2003). *"Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling"*. Water Resources Research 39(9), 1238.
REFSGAARD, J.C.; STORM, B. (1995). "*MIKE SHE*", in *Computer models of Watershed Hydrology*, Ed. por Singh, V.P., Water Resources Publications, Colorado, USA, pp. 809-846.
SAUNDERS, W. (1999). *"Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis"*. In: Proceedings of ESRI User Conference, San Diego, California, USA.
SHAW, D.; MARTZ, L. W.; PIETRONIRO, A. (2005). *"Flow routing in large-scale models using vector addition"*, Journal of Hydrology 307, pp. 38-47.
SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. (2006). *"Watershed Models"*, Taylor & Francis, Boca Raton, EUA, 653 p.
SIVAPALAN, M.; VITNEY, N.; ZAMMIT, C. (2002). *"LASCAM: Large scale catchment mode"*, in *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Ed. por Singh, V., e Frevert, D., Water Resources Publications, Colorado, EUA, pp. 577-648.
SOILLE, P.; VOGT, J.; COLOMBO, R. (2003). *"Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models"*, Water Resources Research 39(12), 1366.
TODINI, E. (2002). *"The ARNO model"*, in *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Ed. por Singh, V. e Frevert, D., Water Resources Publications, Colorado, EUA, pp 687-716.
TRIBE, A. (1992). *"Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method"*. Journal of Hydrology 139, pp. 263-293.
TURCOTTE, R.; FORTIN, J.-P.; ROUSSEAU, A.N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J.-P. (2001). *"Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network"*. Journal of Hydrology 240, pp. 225-242.
VALERIANO, M.M.; KUPLICH, T.; STORINO, M.; AMARAL, B.; MENDES JR., J.; LIMA, D. (2006). *"Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with shuttle radar topographic mission-90m data"*. Computers and Geosciences 32, pp. 1169-1181.
WALKER, J.; WILLGOOSE, G.R. (1999). *"On the effect of digital elevation model accurracy on hydrology and geomorphology"*. Water Resources Research 35(7), pp. 2259-2268.
WANG, M.; HJELMFELT, A.T.; GARBRECHT, J. (2000) *"DEM aggregation for watershed*

modeling”, J. Amer. Water Resour. Assoc. 36(3), pp. 579-584.
ZHU, Q.; TIAN, Y.; ZHAO, J. (2006). *“An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis”*. Computers and Geosciences 32, pp. 615-623.