

DISCRETIZAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS DE GRANDE

ESCALA: grade regular x mini-bacias

*Adriano Rolim da Paz¹; Diogo Costa Buarque², Walter Collischonn³; Daniel de Castro Victoria⁴
& Ricardo Guimarães Andrade⁵*

Resumo – O emprego de modelos hidrológicos distribuídos (MHD) de grande escala para diversos propósitos é tema de pesquisa bastante relevante atualmente, principalmente para avaliação de impactos potenciais de cenários de variabilidade climática ou de mudança de uso da terra sobre os recursos hídricos. A etapa inicial da aplicação de MHD é a subdivisão ou discretização da bacia em elementos menores e o estabelecimento da rede de drenagem que os conecta. Devido à falta de conhecimento e às facilidades propiciadas por ferramentas automáticas, aspectos importantes dessa etapa são muitas vezes negligenciados pelos usuários. Este artigo discute os principais métodos de discretização, com foco principal na grade regular e mini-bacias. Tomando a bacia do rio Ji-Paraná (RO) como estudo de caso, são apresentadas vantagens e limitações de cada método. Os resultados evidenciaram que, enquanto o uso de grade regular uniformiza o tamanho dos elementos, a dificuldade em definir as direções de fluxo e os trechos de rio para propagação do escoamento permanece como principal desvantagem, a despeito de metodologias propostas mais recentemente. A abordagem em mini-bacias supera tais limitações, mas causa o inconveniente de ter que lidar com enorme variação de área superficial e comprimentos de trecho de rio entre os elementos.

Abstract – The use of large-scale distributed hydrological models (DHM) for several purposes is a strongly relevant research area nowadays, mostly for estimating potential impacts of climate variability and land use change over the water resources. The first step for applying a DHM is basin subdivision or discretization into elements and the establishment of the drainage network connecting them. Owing to missing knowledge and the easy to use of automatic procedures, major aspects of this step may be disregarded by users. This paper discusses the most important discretization approaches, focusing on regular grid cells and division into sub-catchments. Considering the Ji-Paraná (RO) river basin as study case, the advantages and limitations of each method are presented. Results show that, while the regular grid standardizes element dimensions, the difficulty on defining flow directions and river reaches for flow routing continues to be the major disadvantage, despite of more recent proposed methodologies. The sub-catchments division approach overcomes such shortcomings, but causes the inconvenience of having to deal with an enormous range of surface area and river reach length among elements.

Palavras-Chave – modelagem hidrológica distribuída, mini-bacias, rede de drenagem.

¹ Professor Adjunto do Depto de Eng. Civil e Ambiental – CT – UFPB. Campus I, João Pessoa-PB, 58059-900. (83) 3216 7355. Email adrianorpaz@yahoo.com.br.

² Doutorando do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre-RS, 91501-970. (51) 3308 6670. Email diogo.buarque@gmail.com.

³ Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre-RS, 91501-970. (51) 3308 6670. Email collischonn@iph.ufrgs.br.

⁴ Pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite, Embrapa Monitoramento por Satélite, Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão, Campinas-SP, 13070-115. (19) 3211 6200. Email daniel@cnpm.embrapa.br.

⁵ Pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite, Embrapa Monitoramento por Satélite, Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão, Campinas-SP, 13070-115. (19) 3211 6200. Email ricardo@cnpm.embrapa.br.

INTRODUÇÃO

A modelagem matemática dos processos hidrológicos tem sido empregada desde o início do século XIX (Cunge *et al.*, 1981; Abbott, 1979). Simplificações na representação matemática são adotadas conforme a disponibilidade de dados, a capacidade do modelo em produzir informações apropriadas para responder às questões formuladas, as características do sistema modelado e a disponibilidade de recursos computacionais, de tempo e de material humano (Fread, 1992).

No caso da representação dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas de grande escala, da ordem de dezenas ou centenas de milhares de quilômetros quadrados, modelos hidrológicos do tipo distribuído (MHD) têm sido empregados. A motivação principal do uso de MHD é poder considerar a variabilidade espacial das características físicas da bacia, como tipo de solo, cobertura vegetal e relevo, e das forçantes meteorológicas, como precipitação e temperatura do ar. Outro aspecto que tem impulsionado o uso de MHD é o crescente desenvolvimento e aprimoramento de novas tecnologias para coleta de dados (Stelling e Verwey, 2005). Existe forte tendência atual de passar da tradicional coleta de dados pontual para a obtenção de dados espacialmente distribuídos, abrangendo, por exemplo, topografia, rugosidade, características da vegetação, áreas inundadas e níveis de enchente (Verwey, 2001; Mertes, 2002).

O desenvolvimento e a aplicação de MHD para diversos propósitos estão entre os temas mais abordados nos estudos e pesquisas hidrológicas atualmente. Em particular, destacam-se os interesses de avaliar potenciais impactos de cenários de variabilidade/mudança climática ou de mudança de uso da terra sobre os recursos hídricos de uma região.

No modelo hidrológico distribuído, a bacia é subdividida ou discretizada em elementos menores, interconectados pela rede de drenagem. Em geral, MHD são compostos por módulos que calculam o balanço hídrico no solo, interceptação, evapotranspiração, propagação do escoamento dentro do elemento e propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem, ou seja, entre elementos.

Para cada modelo, em geral existem ferramentas computacionais que automatizam o estabelecimento da discretização da bacia segundo seus critérios de discretização (Hellweger e Maidment, 1999; Buarque *et al.*, 2008; Paz e Collischonn, 2007a; Olivera *et al.*, 2006). Tais ferramentas determinam a definição da rede de drenagem que interconecta os elementos, a topologia da discretização e a extração de características físicas de cada elemento, em geral a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE). Esses procedimentos muitas vezes operam em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ou pelo menos trocam informações com um SIG (Martin *et al.*, 2005).

A automatização de etapas de preparação de dados de MHD traz, obviamente, uma série de vantagens, como: a diminuição do tempo necessário para aplicação do modelo hidrológico; a redução de erros devido à eventual inoperância do usuário; a redução de fatores subjetivos, levando à padronização das informações de entrada para o modelo; e a diminuição da necessidade do usuário de conhecer o funcionamento do modelo hidrológico a nível mais profundo, o que torna essa ferramenta possível de ser utilizada por uma gama maior de profissionais. Quando operada em conjunto com um ambiente SIG, a automatização pode ainda evitar a necessidade de um conhecimento mais aprofundado do ambiente por parte do usuário, principalmente quando uma seqüência de operações são bem definidas.

Alguns desses argumentos que explicam as vantagens, entretanto, também podem ser vistos como desvantagens do uso de procedimentos automáticos. O principal deles é justamente o de aumentar as chances da utilização do modelo hidrológico de forma equivocada, por o usuário desconhecer maiores detalhes de seu funcionamento e requisitos e, dessa forma, não ser capaz de analisar criticamente cada etapa da aplicação do modelo.

Uma das etapas invariavelmente pouco questionadas pelos usuários de modelos hidrológicos é a discretização do modelo, principalmente quanto ao tamanho dos elementos da discretização e à topologia da rede de drenagem que conecta tais elementos. Mesmo entre usuários mais experientes, pouco se discute sobre a relação da discretização do modelo com a representação das características físicas e de alguns processos hidrológicos da bacia. Este artigo apresenta as principais formas de discretização de MHD e discute as vantagens e desvantagens de cada abordagem. Tomando a bacia do rio Ji-Paraná (RO) como estudo de caso, os dois métodos de discretização mais utilizados são aplicados e avaliados quanto a diferentes aspectos.

FORMAS DE DISCRETIZAÇÃO DE MHD

Existem várias formas de discretizar a bacia em um MHD: (i) grade regular; (ii) *quad-tree* ou grade com sub-níveis; (iii) mini-bacias; (iv) elementos de curva de nível; (v) planos e canais; (vi) grades parciais. Para modelagem hidrológica de grande escala, os últimos três métodos não são usualmente empregados e, portanto, não são tratados neste artigo. A seguir descrevem-se, brevemente, os três primeiros métodos de discretização.

Grade regular

A discretização de MHD em grade regular é a forma mais comum e consiste simplesmente em dividir a bacia em elementos de iguais dimensões dispostos na forma de uma grade (Figura 1-a e Figura 1-b). Para bacias de grande escala, a dimensão desses elementos em geral é da ordem de 5,

10 ou 20 km. A grande vantagem desse método de discretização é justamente o formato de matriz ou *raster*, que facilita o cruzamento com outros planos de informação, já que mapas de tipos de solo ou cobertura vegetal, por exemplo, são tipicamente na forma de imagens raster. Esse formato também facilita a integração em um ambiente de SIG, assim como o acoplamento com modelos atmosféricos, cuja discretização também é em grade. A crescente demanda pelo intercâmbio de informações entre modelos hidrológicos e atmosféricos foi justamente o motivo principal que impulsionou o uso da discretização em grade dos modelos hidrológicos desde a década de 70.

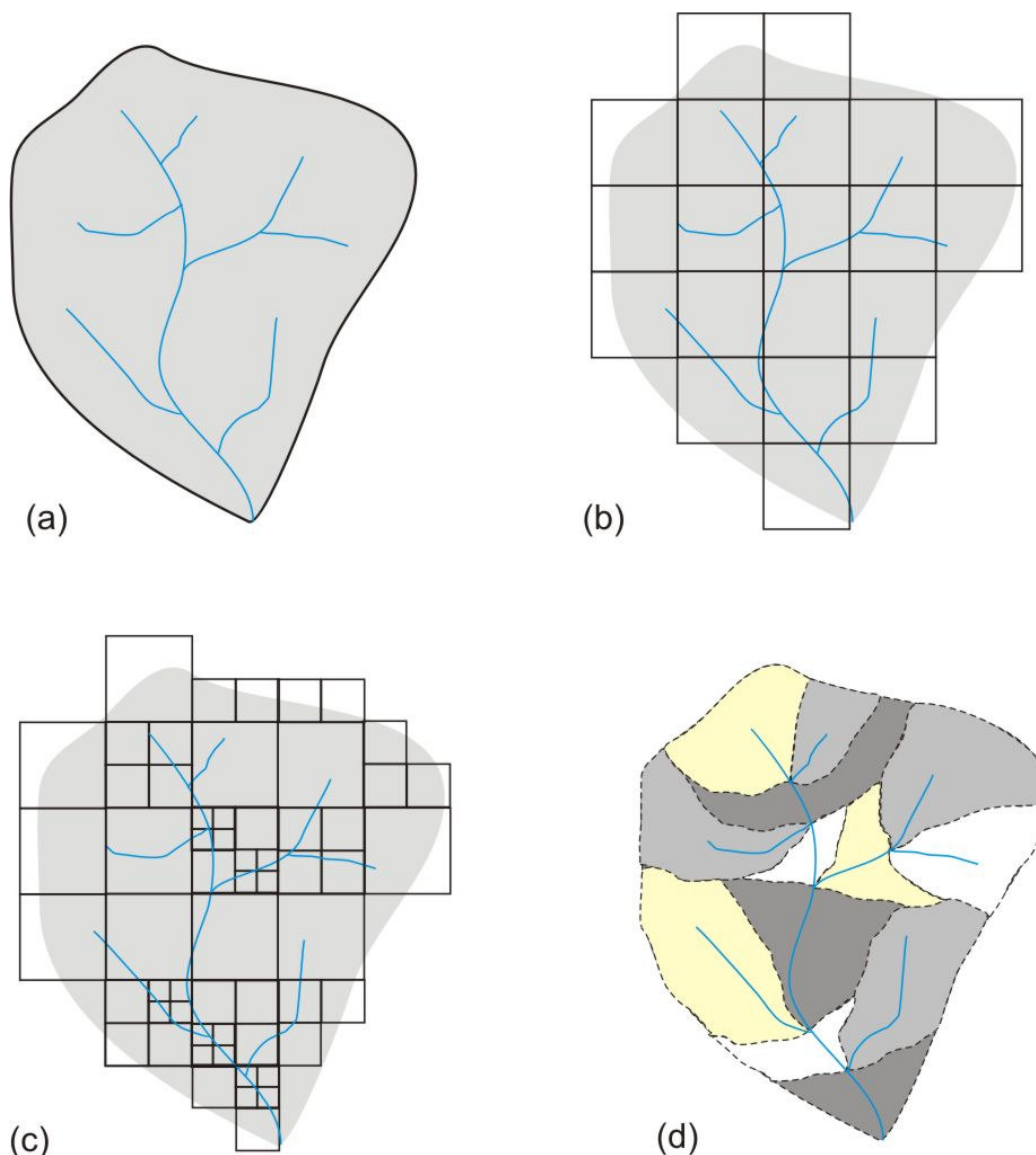


Figura 1 – Métodos de discretização da bacia hidrográfica (a) dentro de um modelo hidrológico: (b) grade regular; (c) quad-tree; (d) mini-bacias (método das confluências).

Para estabelecer a topologia de conexão entre os elementos, são calculadas as direções de fluxo, que é um plano de informações segundo o qual se define para qual dos oito elementos vizinhos segue o escoamento oriundo de cada elemento da grade. O procedimento mais

recomendado para isso é o *upscaling* de direções de fluxo, que consiste em derivar as direções de fluxo dos elementos da grade do modelo hidrológico de grande escala a partir das direções de um MDE com grade mais refinada e das direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem derivadas a partir dele (Paz *et al.*, 2006; O'Donnell *et al.*, 1999; Reed, 2003; Olivera *et al.*, 2002).

A derivação das direções de fluxo na mesma resolução espacial do MDE pode ser realizada por diversos métodos, sendo o mais comum o método original D8 como apresentado em Jenson e Domingue (1988) e Mark (1984). Abordagens mais recentes tem sido desenvolvidas, com destaque para o algoritmo Priority First Search de Sedgewick (1992), como implementado no software IDRISI, segundo resultados comparativos obtidos por Buarque *et al.* (2009) para trechos da bacia amazônica.

Medidas quantitativas podem ser utilizadas para avaliar o grau de coerência entre a rede de drenagem resultante do *upscaling* de direções de fluxo e a rede de drenagem mais refinada, derivada do MDE, como apresentado por Davies e Bell (2009), que apresentam interessante comparação de vários métodos de *upscaling* propostos na literatura.

Os modelos hidrológicos simulam diversos processos hidrológicos internamente a cada elemento da grade e, posteriormente, propagam os escoamentos resultantes ao longo da rede de drenagem que interconecta tais elementos. Surge uma questão, muitas vezes, negligenciada: por qual trecho de rio segue o escoamento entre dois elementos da grade, e qual a extensão e a declividade de tal trecho?

A forma mais simples e mais praticada de estabelecer essa rede de drenagem é: (a) para uma conexão entre elementos situados ortogonalmente entre si, considerar um trecho de rio com comprimento igual ao tamanho do elemento e declividade dada pela divisão entre a diferença de elevação média desses elementos pelo tamanho do elemento; (b) para uma ligação diagonal entre elementos, considerar trecho de rio com comprimento igual a $\sqrt{2}$ vezes o tamanho do elemento, e declividade calculada de forma análoga ao caso anterior. Em Paz e Collischonn (2007b) são discutidas outras formas de estabelecer a rede de drenagem que interconecta os elementos de grade de um modelo hidrológico distribuído. Dentre os métodos disponíveis, destaca-se a abordagem proposta por Paz e Collischonn (2007a), segundo a qual um algoritmo é utilizado para que trechos de rio extraídos com uma escala mais detalhada sejam associados como representações das ligações entre elementos da discretização do modelo hidrológico, sendo em seguida calculados os comprimentos e declividades correspondentes.

Quad-tree

O método de discretização conhecido por quad-tree segue uma estrutura de árvore hierárquica, baseada na subdivisão recursiva de elementos de grade em quatro elementos menores de igual tamanho (Burrough e McDonnel, 1998). Cada elemento é sucessivamente sub-dividido em quadrantes até obter o nível de refinamento desejado (Figura 1-c), em função da topografia, rede de drenagem, ou outras características físicas. Ao contrário da discretização em grade, o método quad-tree permite representar detalhes apenas em regiões específicas da bacia, evitando o custo computacional excessivo se fosse refinar toda a malha numérica.

Mini-bacias

Nesta abordagem, a bacia é discretizada em sub-bacias menores, denominadas de mini-bacias. Como se trata de modelos distribuídos, a subdivisão procura obter elementos de dimensões relativamente equivalentes às dimensões dos outros métodos de discretização, e não meramente dividir a bacia em algumas poucas sub-bacias. Porém, a divisão em mini-bacias depende da topografia e, conforme o método utilizado, a obtenção de elementos de dimensões semelhantes é dificultada.

Existem várias formas de dividir uma bacia em mini-bacias, como por exemplo: (a) divisão segundo as confluências da rede de drenagem; (b) divisão segundo o método de Otto Pfastetter; (c) divisão em elementos de área superficial similar.

Na divisão segundo as confluências, percorre-se a rede de drenagem de montante para jusante e, para cada confluência encontrada, identificam-se e delimitam-se as mini-bacias correspondentes às áreas contribuintes incrementais das seções dos rios imediatamente a montante da confluência (Figura 1-d).

A sub-divisão de bacias segundo o método Pfastetter é uma abordagem baseada tanto na topografia quanto na topologia da rede de drenagem, de modo que os números de identificação de cada elemento ou mini-bacia contenham dígitos com significado topológico (Verdin e Verdin, 1999). Para realizar tal forma de discretização, o primeiro passo consiste em identificar o rio principal e os quatro principais afluentes (Figura 2). Em seguida, delimitam-se as áreas de drenagem desses quatro tributários, cujas bacias recebem o rótulo 2, 4, 6 ou 8 na ordem de jusante para montante. As áreas de contribuição intermediárias recebem os rótulos 1, 3, 5, 7 e 9. As regras de discretização são então re-aplicadas, agora para dividir cada uma das sub-bacias anteriores – para cada uma das novas sub-bacias geradas, o primeiro dígito corresponde ao rótulo da sub-bacia de origem, enquanto o segundo dígito corresponde ao novo processo de divisão. Esse procedimento é repetido tantas vezes quanto necessário para obter o nível de discretização desejado.

Ao final do processo de divisão em mini-bacias segundo os critérios de Otto Pfafstetter, também conhecidas por otto-bacias, a codificação obtida permite inferir diretamente sobre as características topológicas, como posição relativa montante/jusante ou quem contribui para quem, simplesmente pela análise dos dígitos dos rótulos (Verdin e Verdin, 1999). No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) adota as regras de Otto Pfafstetter para a codificação da rede de drenagem das bacias brasileiras, fazendo apenas uma pequena modificação na codificação dos cursos d'água dentro de cada uma delas (ANA, 2006). No trabalho de Buarque *et al.* (2008), é apresentado um algoritmo de divisão em otto-bacias e de extração de características físicas das otto-bacias para entrada em um modelo hidrológico distribuído.

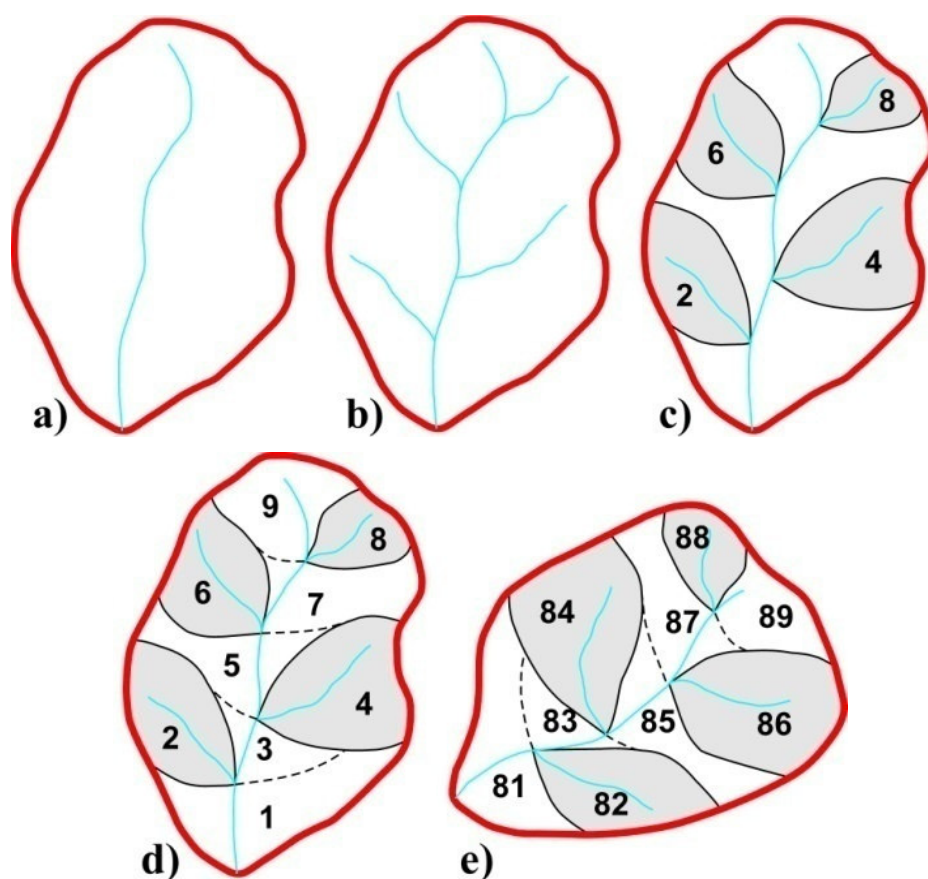


Figura 2 - Esquema da subdivisão de uma bacia pela metodologia de Otto Pfafstetter: a) identificação do rio principal; b) seleção dos quatro afluentes principais; c) delimitação das ottobacias pares; d) delimitação das ottobacias intermediárias ímpares (inter-bacias); e) nível 2 de subdivisão da ottobacia 8 (Fonte: Buarque *et al.*, 2008).

Uma terceira forma de dividir uma bacia em mini-bacias é estabelecer tal discretização com o critério de obter elementos de áreas superficiais similares entre si. A Figura 3 ilustra um exemplo de divisão em mini-bacias com áreas superficiais limitadas ao intervalo entre 80 e 100 km². O procedimento geral consiste em percorrer os caminhos de fluxo de montante para jusante e, ao

alcançar um ponto em que a área de drenagem incremental ultrapassa o limite mínimo desejado, delimita-se uma nova mini-bacia. Entretanto, deve-se prosseguir para jusante a fim de verificar se a mini-bacia rio abaixo conseguirá ter área de drenagem dentro da faixa desejável. Se não, a primeira mini-bacia pode ser revista a fim de enquadrar ambas dentro do intervalo. Trata-se, portanto, de um processo interativo de delimitação. A descrição detalhada desse procedimento foge ao escopo do presente artigo e será apresentada em trabalho posterior.

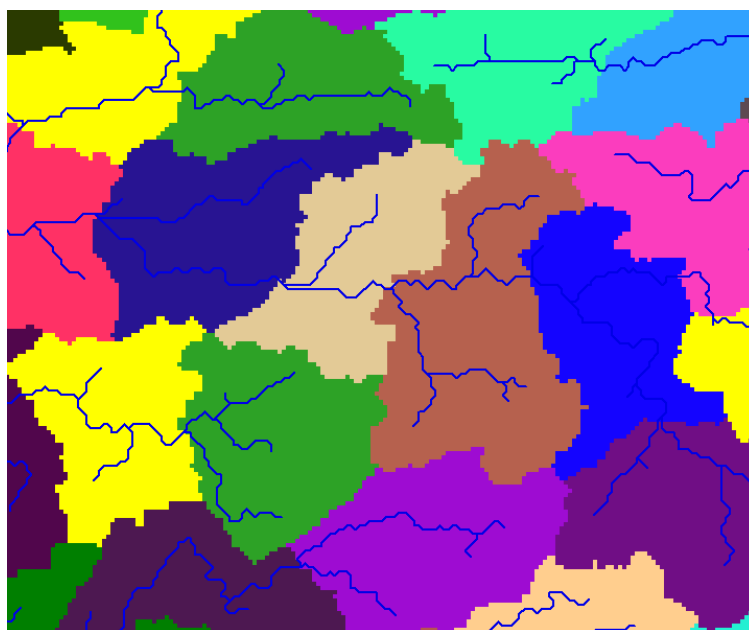


Figura 3 – Exemplo de discretização de um modelo hidrológico em mini-bacias, segundo o critério de área superficial similar.

ESTUDO DE CASO

Situada na parte leste do Estado de Rondônia (Figura 4), a bacia do rio Ji-Paraná tem uma área de drenagem em torno de 75.400 km² e é contribuinte do Rio Madeira. Essa bacia é tomada como estudo de caso neste artigo por ser o objeto de estudo do projeto de pesquisa intitulado “*Modelagem hidrológica e sensores orbitais para estudos de impactos de mudança de uso e cobertura das terras sobre a disponibilidade hídrica na bacia do rio Ji-Paraná (RO)*”, financiado pela EMBRAPA, ao qual este trabalho está associado.

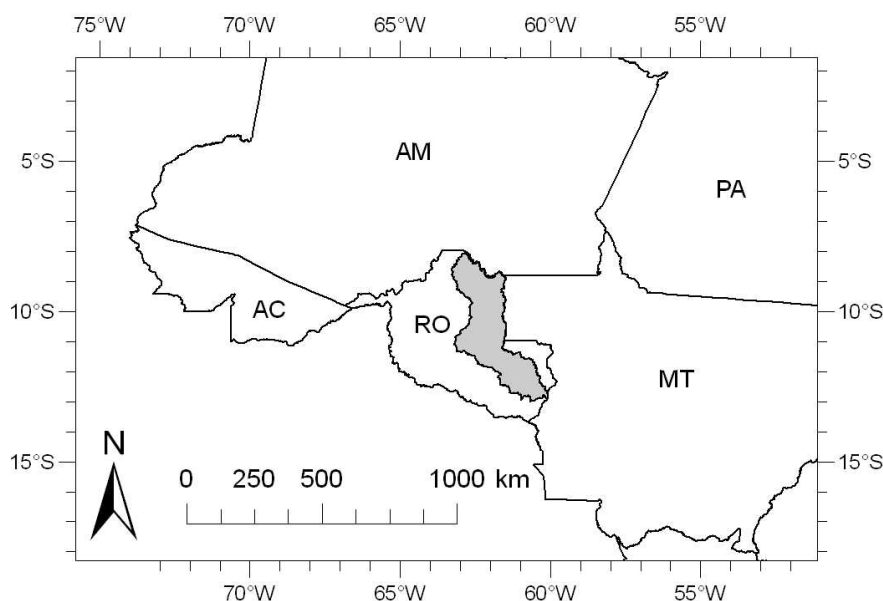


Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do rio Ji-Paraná na Região Norte do Brasil.

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

Para maior discussão e análise comparativa, foram selecionados para aplicação à bacia do rio Ji-Paraná os dois métodos de discretização mais utilizados em modelos hidrológicos distribuídos de grande escala: discretização em grade regular e em mini-bacias segundo as confluências. A informação básica utilizada para ambos os métodos foi o MDE proveniente dos dados do SRTM, disponibilizados pelo CSI-CGIAR geoportal (dados SRTM V1, 2004, <http://srtm.csi.cgiar.org>), reamostrados para a resolução espacial de 100 m.

Para estabelecer a discretização em grade regular e a rede de drenagem de conexão entre elementos, foram utilizados os procedimentos descritos em Paz *et al.* (2006) e Paz e Collischonn (2007a). Foi considerada uma grade de elementos com dimensões $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (ou $\sim 10 \times 10$ km).

Para a discretização em mini-bacias seguindo o critério das confluências, foram utilizadas as rotinas computacionais do *Arc Hydro* (Maidment, 2002), que é um conjunto de ferramentas desenvolvidas para processamento de informações hidrológicas a partir do MDE de forma integrada ao software *ArcGIS*. Tais rotinas servem atualmente de preparação de dados para o modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007), como descrito em Collischonn *et al.* (2010). Esse procedimento foi realizado variando o parâmetro área mínima, que denota a área de contribuição mínima para indicar o início da rede de drenagem. Foram testados os valores de 20 e 80 km².

RESULTADOS

A discretização em grade da bacia do rio Ji-Paraná em elementos regulares de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ é apresentada na Figura 5. Ao total, são 611 elementos com área superficial variando entre $120,8$ e $122,8 \text{ km}^2$ – a variação da área é função da conversão para unidades planas em função da posição geográfica de cada elemento, já que a discretização é em unidades de grau. De modo geral e segundo comparação visual, a rede de drenagem que interconecta os elementos da grade está bastante coerente com a rede de drenagem mais detalhada, derivada diretamente do MDE do SRTM (resolução de $0,0008333^\circ$ ou $\sim 90\text{m}$).

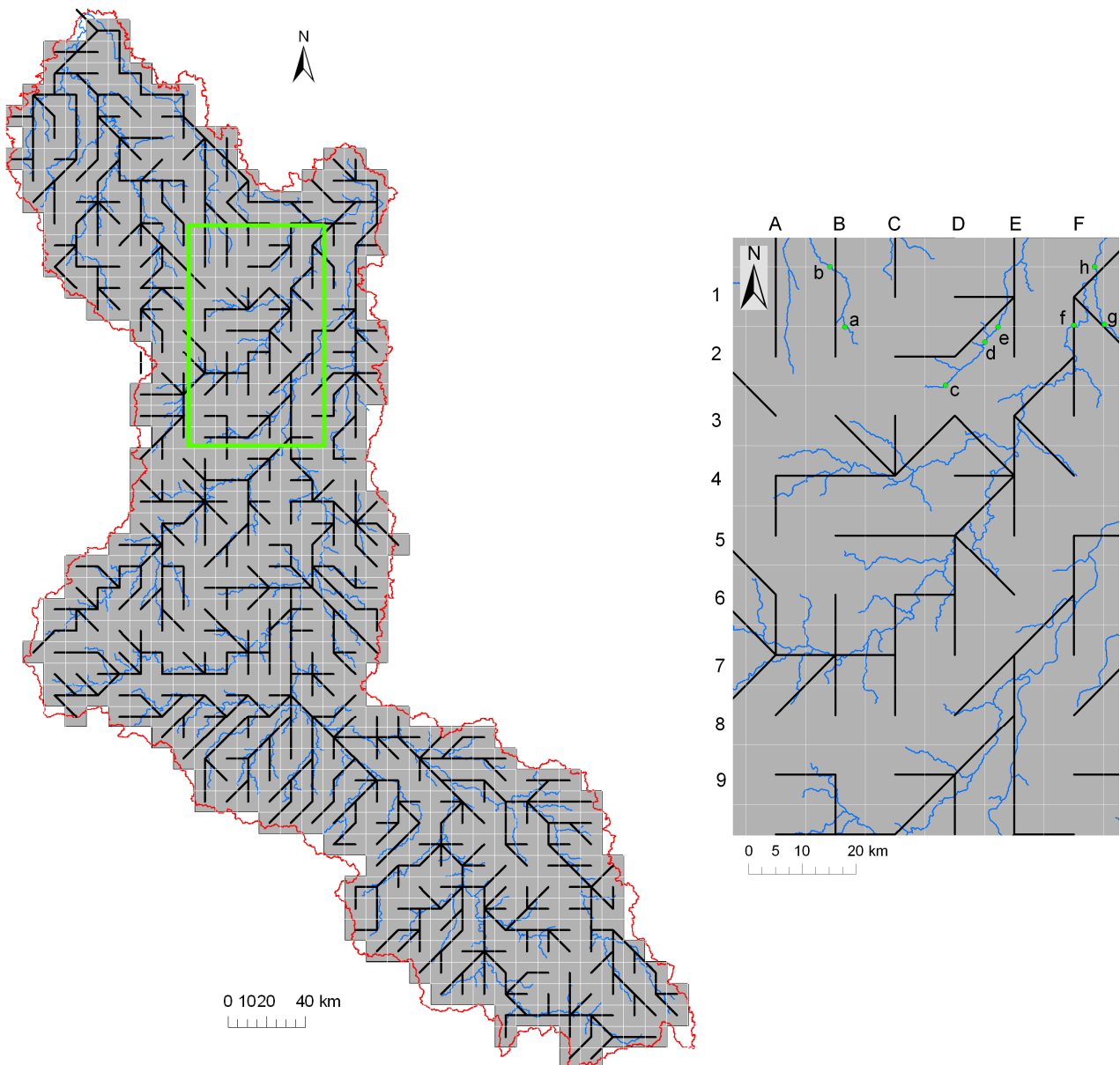


Figura 5 – Discretização da bacia do rio Ji-Paraná em elementos regulares de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, com indicação da rede de drenagem interconectando tais elementos (linha preta), da rede de drenagem derivada diretamente do MDE do SRTM (linha azul) e do contorno da bacia delimitada a partir desse MDE (linha vermelha); no quadro da direita, ampliação da região indicada em verde.

Algumas inconsistências podem ser observadas entre as duas redes de drenagem, sendo que parte delas poderia ser evitada, talvez pela variação de parâmetros do método de upscaling empregado (Paz *et al.*, 2006), ou através de correção manual posterior ao cálculo. Por exemplo, o elemento D8 deveria drenar para o elemento E8. Outro exemplo é o elemento C4, que poderia drenar para o elemento D4, e esse deveria drenar para o elemento D3.

Existem outras inconsistências, entretanto, para as quais não existe correção absoluta, isto é, não há como alterar a rede de drenagem de baixa resolução para ficar totalmente coerente com a resolução mais fina. Esse é o caso dos elementos que contribuem para o elemento E7, por exemplo. Existem dois cursos d'água principais, alinhados no sentido sul-norte, que seguem em paralelo a uma distância tão pequena que estão correndo dentro do mesmo elemento (E9 e E8). Na rede de drenagem detalhada, o fluxo desses dois rios converge apenas dentro do elemento E7, mas, segundo a rede de drenagem de baixa resolução, esse fluxo já converge no elemento E8. A direção de fluxo do elemento D9 poderia ser alterada para drenar o escoamento para D8, fazendo com que a convergência mencionada ocorresse apenas no elemento E7. Contudo, isso faria com que a área de contribuição do elemento E8 fosse inferior a real.

Como se trata de representar características naturais por elementos quadrados, sempre ocorrerão inconsistências como a mencionada no parágrafo anterior. Isso é independente do método utilizado para o upscaling e do método utilizado para determinar a rede de drenagem diretamente do MDE. Trata-se de uma das principais desvantagens de utilizar a discretização de modelos hidrológicos em grade regular.

A outra desvantagem é a dificuldade ainda maior de associar trechos de rio para cada conexão entre dois elementos, com a conseqüente determinação dos comprimentos e declividades, informações necessárias para a propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem. Tomando os elementos em destaque na Figura 5 (quadro da direita), para poucos deles a identificação do trecho de rio correspondente parece ser tarefa fácil. Por exemplo, para o elemento B1 é fácil identificar o trecho a-b como o caminho por onde segue o escoamento até alcançar seu vizinho ao norte. O comprimento e a declividade desse trecho a-b poderiam, portanto, ser utilizados para a propagação do escoamento até o elemento ao norte. Entretanto, para o elemento F1 há uma grande indecisão: considerar o trecho f-h ou o trecho g-h? E para o elemento D2, cuja conexão é com o elemento E1, será que o trecho de rio c-d, localizado no interior de D2, representa a distância percorrida pelo escoamento até alcançar o elemento de jusante? Ou seria melhor adicionar a tal trecho a parte d-e?

Na literatura, apenas o algoritmo proposto por Paz e Collischonn (2007a) aborda uma forma sistemática de estabelecer essa associação entre trechos de rio e conexões de elementos. Por melhor que tal método realize essa associação, contudo, certamente ocorrerão situações incoerentes. Apesar disso, deve ser ressaltada a diferença que é entre realizar uma abordagem como essa e a adoção simplificada de considerar a distância geométrica entre elementos (comprimento igual à dimensão do elemento para vizinhos ortogonais; e igual à $\sqrt{2}$ vezes essa distância para vizinhos diagonais). Segundo esse critério simplificado, para elementos de dimensão 10 km, todos os trechos de rio teriam comprimentos de 10 km ou de 14,1 km. O histograma apresentado na Figura 6, correspondente à discretização da bacia do rio Ji-Paraná, mostra em apenas 22% dos casos o trecho de rio teve comprimento entre 10 e 15 km. Em 15% dos casos o valor foi inferior a 10 km, enquanto em 64% dos casos o comprimento foi superior a 15 km, ocorrendo valores superiores a até 40 km. Na construção do referido histograma, os elementos situados nas cabeceiras foram desprezados, restando 325 elementos.

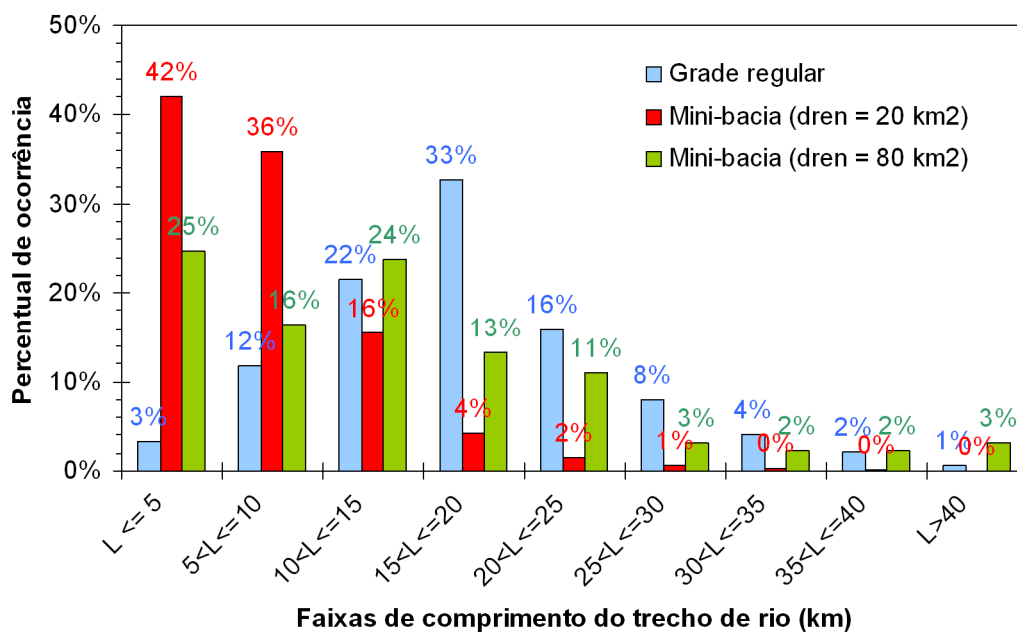


Figura 6 – Histograma dos comprimentos de trecho de rio associados aos elementos da discretização em grade e em mini-bacias, essa última calculada de duas formas: considerando área contribuinte mínima de 20 km² e de 80 km² para denotar o início da rede de drenagem.

Para a discretização da bacia segundo o método de mini-bacias e confluências (Figura 7), é resolvida a questão de como estabelecer a conexão hidrológica entre elementos da discretização, já que tal conexão segue exatamente o próprio traçado da rede de drenagem de alta resolução. Como esse método define as mini-bacias segundo as confluências, em cada mini-bacia só existe um único

curso d'água, o que resolve também a questão de associar um trecho de rio para a propagação do escoamento até o elemento de jusante.

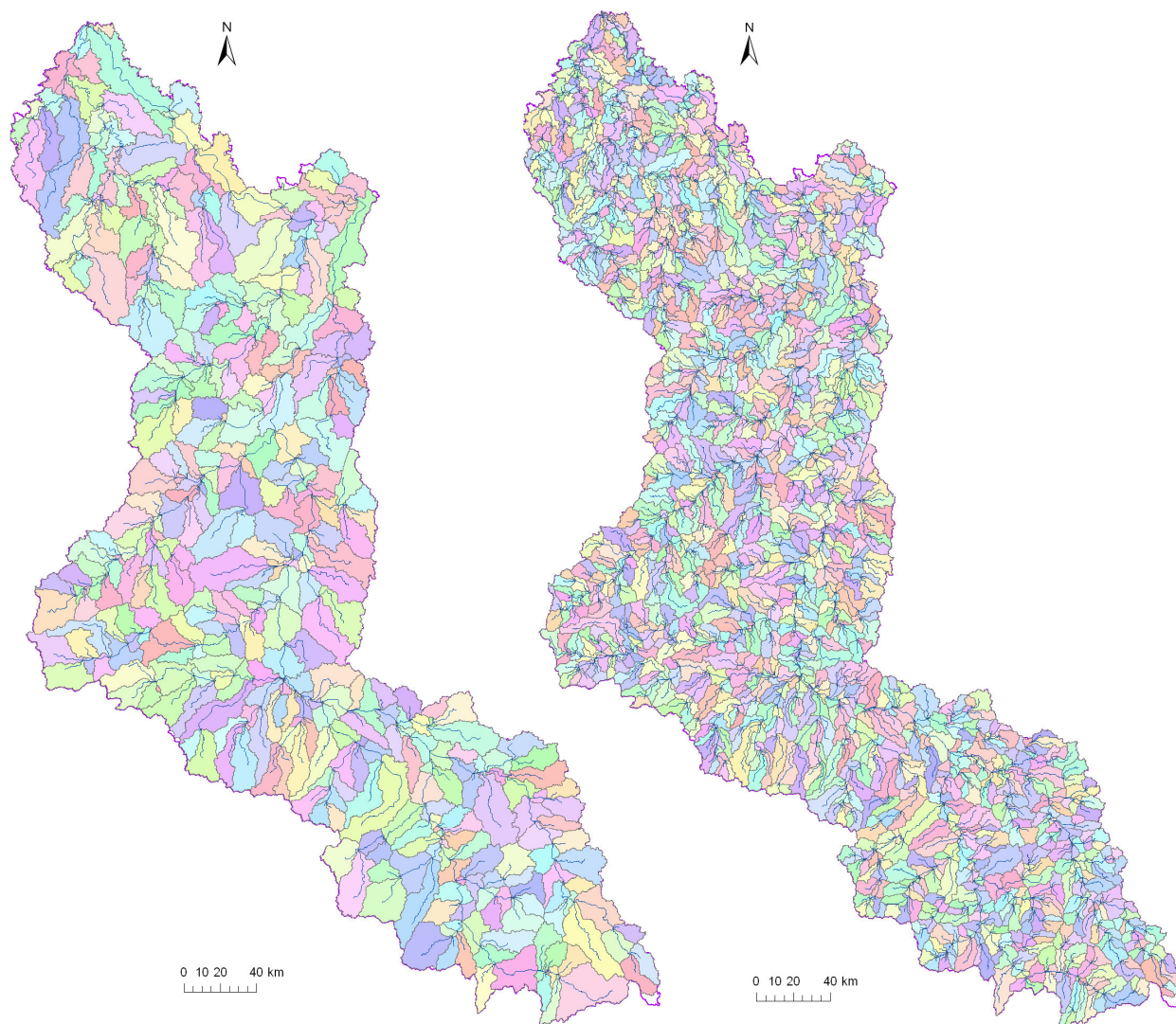


Figura 7 – Discretização da bacia do rio Ji-Paraná em mini-bacias, pelo critério das confluências, considerando uma área mínima indicativa de início da rede de drenagem igual a 80 km^2 (mapa da esquerda; total de 439 mini-bacias) e 20 km^2 (mapa da direita; total de 1727 mini-bacias).

O forçamento da sub-divisão em mini-bacias segundo as confluências, contudo, faz com que ocorra uma grande variação na área superficial desses elementos de discretização. Para a bacia do rio Ji-Paraná, a Figura 8 apresenta o histograma das áreas superficiais das mini-bacias calculadas, considerando os dois valores de área mínima de início de drenagem. As mini-bacias situadas nas cabeceiras foram desprezadas, restando uma quantidade total de 863 e 219 elementos, para a área contribuinte mínima de 20 e 80 km^2 , respectivamente.

Para o valor do parâmetro área inicial de drenagem igual a 20 km^2 , 80% das mini-bacias ficaram com área superficial inferior a 50 km^2 , sendo que 6% chegaram a ter menos de 1 km^2 , enquanto 5% ficaram com área superior a 100 km^2 . Com o parâmetro área inicial de drenagem igual

a 80 km², a rede de drenagem fica menos detalhada e, como esperado, resulta em mini-bacias da discretização de maior área superficial. Nesse caso, apenas 35% das mini-bacias ficaram com área inferior a 50 km², mas ocorrendo ainda elementos com áreas bem pequenas (por exemplo, 2% deles têm área inferior a 1 km²). Por outro lado, o aumento do referido parâmetro levou a ter mini-bacias com dimensões de até mais de 400 km² (3%), sendo que 16% delas ficaram com área superior a 200 km². Para efeito comparativo, no mesmo gráfico tem-se o valor de área superficial dos elementos da grade regular, todos eles em torno de 120 km².

A questão da área superficial das mini-bacias merece atenção quanto à modelagem de alguns processos hidrológicos e, principalmente, quanto às hipóteses assumidas. Por exemplo, alguns modelos assumem que os elementos têm dimensões grandes o suficiente para considerar que o escoamento subterrâneo gerado pela infiltração e percolação profunda no seu interior retorna à superfície e contribui para o escoamento na calha do rio ainda dentro do próprio elemento, desprezando o fluxo subterrâneo entre elementos. Desse ponto de vista, o uso da discretização em mini-bacias segundo o critério das confluências demanda um tratamento específico para aquelas com áreas muito pequenas, para as quais a hipótese mencionada pode ser invalidada.

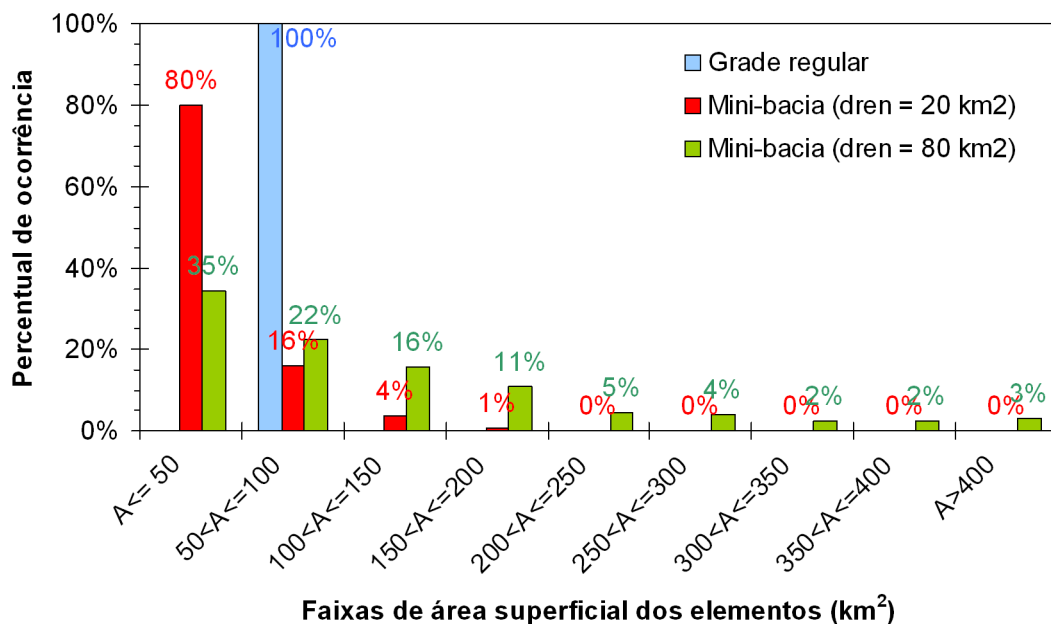


Figura 8 – Histograma das áreas superficiais dos elementos da discretização em grade e em mini-bacias, essa última calculada de duas formas: considerando área contribuinte mínima de 20 km² e de 80 km² para denotar o início da rede de drenagem.

Além da área superficial, o processo de discretização segundo as confluências também propicia grande variação do comprimento dos trechos de rio internamente às mini-bacias. Para o

caso da bacia do rio Ji-Paraná, com um valor de área de drenagem inicial igual a 20 km^2 , cerca de 42% das mini-bacias tiveram trecho de rio com comprimento inferior a 5 km e 78% inferior a 10 km (Figura 6). O uso do valor de 80 km^2 como área inicial de drenagem resulta em trechos de rio de maior comprimento, como esperado. Em 25% das mini-bacias o comprimento está abaixo de 5 km, enquanto em 53% delas o comprimento está na faixa de 5 a 20 km. Valores muito pequenos de comprimento de rio podem causar instabilidades numéricas em alguns métodos de simulação de propagação de vazões, como o método Muskingum-Cunge, principalmente quando associados a declividades também pequenas. Isso demanda tratamentos específicos internamente às rotinas computacionais do modelo.

Inversamente, a presença de elementos da discretização com área muito grande em relação aos demais pode trazer inconvenientes quanto ao processo de calibração e à diminuição do detalhamento da representação de processos hidrológicos.

CONCLUSÕES

A análise apresentada evidenciou que, enquanto o uso de grade regular como forma de discretização de um modelo hidrológico traz a vantagem intrínseca de uniformização do tamanho dos elementos, a dificuldade em definir as direções de fluxo e os trechos de rio para propagação do escoamento permanece como principal desvantagem. Apesar de metodologias propostas mais recentemente quanto à realização de tais tarefas, sempre ocorrerão inconsistências devido ao fato de tentar representar características naturais com elementos quadrados.

A abordagem em mini-bacias supera essas limitações da grade regular, mas causa o inconveniente de ter que lidar com enorme variação de área superficial e comprimentos de trecho de rio entre os elementos. Os procedimentos automatizados utilizados para estabelecer essa discretização poderiam ser adaptados para agrupar mini-bacias consideradas de tamanho inferior a um valor mínimo pré-estabelecido, bem como para dividir mini-bacias com área superior a outro valor limite pré-definido.

Quando da aplicação de modelos hidrológicos distribuídos, todos esses aspectos da discretização levantados neste estudo devem ser observados, criticados e, se necessário, devem ser propostas correções das informações geradas previamente à entrada no modelo hidrológico. Recomenda-se, também, o desenvolvimento de adaptações às rotinas computacionais de preparação de dados para atender a critérios como a restrição de áreas máxima e mínima para os elementos.

BIBLIOGRAFIA

- ABBOTT, M.B. (1979). *Computational hydraulics - Elements of the theory of free surface flows*. Pitman Advanced Publishing Program, Londres (Inglaterra), 326 p.
- ANA (2006). *Topologia Hídrica: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos*. Versão 1.11. Agência Nacional de Águas – ANA, 30p.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. (2009). “*Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 14(2), pp. 91-103.
- BUARQUE, D.C.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. (2008). “*Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos*” in Simpósio Sul-Sudeste de Recursos Hídricos, ABRH, Rio de Janeiro (RJ).
- BURROUGH, P.A.; MCDONNEL, R.A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford, 333 p.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2007). “*The MGB-IPH model for large scale rainfall runoff modelling*”. Hydrological Sciences Journal 52(5), pp. 878–895.
- COLLISCHONN, W.; KAYSER, R.; BUARQUE, D.C.; PAIVA, R.C.D.; FAN, F.M. (2010). *Manual de Discretização de Bacias para Aplicação do Modelo MGB-IPH - Versão 2.0*, Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico, FINEP/ANA/IPH-UFRGS, Porto Alegre (RS), 50 p.
- CUNGE, J.A.; HOLLY, F.M.; VERWEY, A. (1981). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing, Boston (EUA), 420 p.
- DAVIES, H.N.; BELL, V.A. (2009). “*Assessment of methods for extracting low-resolution river networks from high-resolution digital data*”. Hydrological Sciences Journal 54(1), pp. 17-28.
- FREAD, D.L. (1992). “*Flow Routing*”, in *Handbook of Hydrology*. Ed. por Maidment, D.R. McGraw-Hill.
- HELLWEGER, F.L.; MAIDMENT, D.R. (1999). “*Definition and connection of hydrologic elements using geographic data*”. Journal of Hydrologic Engineering 4(1), pp. 10-18.
- 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.

- MAIDMENT, D.R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. ESRI, Imprensa Redlands, Califórnia (EUA), 203 p.
- MARK, D.M. (1984). "Automated detection of drainage networks from digital elevation models". *Cartographica* 21(2-3), pp. 168-178.
- MARTIN, P.H.; LEBOEUF, E.J.; DOBBINS, J.P.; DANIEL, E.B.; ABKOWITZ, S. (2005). "Interfacing GIS with water resource models: a state-of-the-art review." *Journal of the American Water Resources Association* 41(6), pp. 1471–1487.
- MERTES, L.A. (2002). "Remote sensing of riverine landscapes". *Freshwater Biology* 47, pp. 799-816.
- 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.; LEAR, M.S.; FAMIGLIETTI, J.S.; ASANTE, K. (2002). "Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models". *Water Resources Research* 38(11), 1231.
- 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. (2007a). "River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model". *Journal of Hydrology* 343, pp. 127-139.
- PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. (2007b). "Extração automática de comprimentos de trechos de rio a partir do Modelo Numérico do Terreno para modelagem hidrológica distribuída" in *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis*, p. 2985-2992.
- 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).
- REED, S.M. (2003). "Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling". *Water Resources Research* 39(9), 1238.
- SEDGEWICK, R. (1992). *Algorithms in C++*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- STELLING, G.S.; VERWEY, A. (2005). *Numerical flood simulation*. Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons.

VERDIN, K.L.; VERDIN, J.P. (1999). “*A topological system for delineation and codification of the Earth’s rivers basins*”. Journal of Hydrology 218, pp. 1–12.

VERWEY, A. (2001). “*Latest developments in floodplain modeling – 1D/2D integration*” in Proceedings of the Conference on Hydraulics in Civil Engineering. The Institution of Engineers, Austrália.