

Comparação entre dois procedimentos de *upscaling* de redes de drenagem

Jônatan Dupont Tatsch¹
Adriano Paz²
Walter Collischonn²
Humberto Ribeiro da Rocha¹

¹Laboratório de Clima e Biosfera
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Universidade de São Paulo - USP/IAG
Rua do Matão, 1226, CEP 05508-090, São Paulo - SP, Brasil
{jonatan, humberto}@model.iag.usp.br

²Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/IPH
Caixa Postal 15029 - 91501-970 – Porto Alegre - RS, Brasil
adrianorpaz@yahoo.com.br
collischonn@iph.ufrgs.br

Abstract. Large-scale distributed hydrologic models are becoming widely used in hydrologic applications (e.g., streamflow forecasts, climate changes impacts on the hydrologic regime, irrigation and reservoir operation). In these models, the basin is generally subdivided into square grid cells in which hydrological processes are represented, but application of these models to large basins is impractical if grid cells are used with the same resolution as the best available DEM (usually with a resolution less than 100 m). Thus large-scale models often use cells with areas of tenths or hundreds of square kilometers. This work presents a comparative analysis of COTAT+ (Paz et al. 2006) algorithm using two distinct procedures to derive lower resolution river networks from higher resolution Digital Terrain Model: i) straight upscaling and ii) two-step upscaling (from higher resolution to an intermediate resolution, and from this to the coarser resolution). The derived flow networks are evaluated using a range of performance criteria. These include proximity analysis, accuracy in catchment area, and visual comparison. The quantitative assessments provide similar performances between straight and two-step upscaling procedures. However, direct comparison of both coarse resolution river networks with the higher resolution network by visual inspection shows that the two-step upscaling procedure produced a more realistic drainage network than when using the straight upscaling procedure.

Palavras-chave: drainage network, digital terrain model, flow directions, rede de drenagem, modelo numérico do terreno, direções de fluxo.

1. Introdução

Modelos de elevação do terreno (ou também denominados Modelos Numéricos do Terreno – MNT) são utilizados para derivar diversos tipos de produtos, com destaque para a determinação das direções de fluxo e das áreas acumuladas de drenagem. Procedimentos automáticos determinam para qual pixel vizinho cada pixel drena (direção de fluxo) e a área de drenagem que contribui para cada pixel (área acumulada de drenagem), definindo a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica (Jenson e Domingue, 1988). Tais planos de informação são derivados com a mesma resolução espacial do MNT e constituem informação de entrada para diversos tipos de modelos hidrológicos.

Ao trabalhar com grandes escalas (bacias com áreas de drenagem $> 10000 \text{ km}^2$), modelos hidrológicos ou esquemas de superfície de modelos atmosféricos geralmente são discretizados em células em torno de 5 a 20 km de dimensão (Singh e Frevert, 2000; Wood et al., 1997). Embora informações de elevação do terreno e de características de tipo de solo e uso da terra geralmente estejam disponíveis com maior detalhamento, a baixa resolução da discretização de tais modelos é adotada devido ao interesse em questões de maior escala e visando a

redução do custo computacional. Nesses casos, procedimentos de *upscaling* de direções de fluxo são aplicados para estabelecer a rede de drenagem do modelo hidrológico (Paz et al., 2006; Reed, 2003; Olivera et al., 2002). Inicialmente são determinadas as direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem na mesma resolução espacial do MNT (referida aqui como alta resolução; elementos denotados por pixels) e em seguida tais informações são utilizadas para estabelecer as direções de fluxo das células do modelo hidrológico (baixa resolução).

Neste artigo faz-se uma análise comparativa do uso do algoritmo de *upscaling* de direções de fluxo descrito em Paz et al. (2006), adotando-se dois procedimentos: realização do *upscaling* direto (de alta para baixa resolução) e o *upscaling* em duas etapas (da resolução alta para a intermediária, e desta para a baixa resolução). Os resultados de um estudo de caso para a bacia do Mogi-Guaçu e Pardo são apresentados e a viabilidade do emprego do *upscaling* de direções de fluxo com escala intermediária em relação ao *upscaling* direto é avaliada por diversos critérios.

2. Metodologia

2.1 Determinação das informações de alta resolução

Considerando-se que cada pixel drena o escoamento para um de seus oito vizinhos (janela 3x3), o procedimento mais comum de definir a direção de fluxo é o método D8 (ou *deterministic eight-neighbors*, Jenson e Domingue, 1988). Diversas modificações da formulação original foram propostas na literatura, especialmente para tratamento de áreas planas ou aumento do desempenho computacional (p. ex.: Tianqi et al., 2003). Neste estudo aplicou-se o método D8 modificado pela introdução de um fator de aleatoriedade na atribuição de direções de fluxo em áreas planas, seguindo abordagem proposta por Fairfield e Leymarie (1991). Percorrendo-se os caminhos de fluxo pixel a pixel e acumulando-se as áreas superficiais de cada pixel, gera-se outro plano de informações onde a cada pixel é atribuído o valor da área de drenagem contribuinte (Jenson e Domingue, 1988). Portanto, a partir do MNT de alta resolução disponível, são gerados dois *rasters* na mesma resolução espacial: direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem.

2.2 Upscaling de direções de fluxo

O procedimento de *upscaling* consiste em determinar direções de fluxo em uma determinada resolução (células) a partir de informações de direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem em uma resolução maior (pixels). A idéia de usar procedimentos como esse é de que a passagem das informações que caracterizam a drenagem (direções de fluxo e áreas de drenagem acumuladas) para uma escala mais grosseira preserva mais informação acerca dessa drenagem do que passar a informação mais bruta, o MNT, e daí derivar a rede de drenagem. Diversos algoritmos são propostos na literatura como, por exemplo, Olivera et al. (2002), Reed (2003), e Paz et al. (2006).

Neste estudo, foi utilizado o algoritmo proposto por Paz et al. (2006), aqui referenciado como COTAT+ (do inglês *cell outlet tracer area threshold*). Tendo em mente que cada célula da grade de baixa resolução possui N pixels da grade de alta resolução (onde N = resolução alta/resolução baixa), o referido algoritmo pode ser resumido em duas etapas:

- a. Para cada célula, determina-se o pixel exutório que indica qual rio na alta resolução representa o fluxo principal drenado pela célula; esse pixel é escolhido dentre os pixels situados dentro da célula, tomando-se aquele que apresenta a maior área de drenagem e cujo rio a montante dele (no interior da célula) tenha comprimento superior a um valor mínimo pré-estabelecido. Esse limite é em geral prescrito como 1/5 da dimensão da célula. A verificação do comprimento do rio a montante do pixel a ser testado como pixel exutório representa a necessidade de excluir pequenos trechos

de rio que levemente cruzam a célula, mas que na verdade não representam o fluxo principal dessa célula.

- b. Para cada célula, segue-se o caminho de fluxo a partir do pixel exutório e, conforme a trajetória percorrida decide-se para qual das células vizinhas segue o fluxo principal da célula, isto é, qual direção de fluxo deve ter a célula sob análise. Um parâmetro denominado área incremental mínima (AIM) é usado para controlar o momento de parada do caminho de fluxo traçado, tendo efeito principal sobre a escolha de direções de fluxo ortogonais ou diagonais. O valor usual de AIM é igual à área superficial da célula. Quanto maior o valor deste parâmetro mais trechos diagonais conterão a drenagem.

O algoritmo COTAT+ é geralmente aplicado de forma direta, isto é, a partir da resolução do MNT disponível para a resolução menor, definida geralmente pelo interesse do estudo ou pelo modelo hidrológico utilizado. O procedimento aqui testado consiste em realizar o *upscaling* com o algoritmo COTAT+ em duas etapas: da alta resolução para uma intermediária, e desta para a baixa resolução. Os resultados do COTAT+ aplicado de forma direta (UD) e com escala intermediária (UCEI) foram comparados utilizando critérios de avaliação quantitativos e qualitativos, conforme descrito a seguir.

2.4. Critérios de avaliação das redes de drenagem

Para avaliar as redes de drenagem produzidas pelos diferentes métodos foram utilizados critérios (similares aqueles usados por Davies e Bell 2008) que se baseiam na comparação das redes de drenagem de baixa resolução com a de alta resolução. Neste estudo tais resoluções corresponderam, respectivamente, a 9 km e 90 m. Os seguintes critérios de avaliação foram empregados:

- i. Distância média: representa a distância média entre as redes de drenagem de alta e baixa resolução; esta quantidade aumenta quando há grandes espaços entre as redes de drenagens; uma rede de drenagem de baixa resolução perfeita teria uma distância média igual à zero. Destaca-se que este índice não identifica se o rio derivado mais próximo é realmente aquele que está representando o rio de alta resolução, mas desvios notáveis devem levar a erros de posicionamento em outros locais da rede de drenagem.
- ii. Porcentagem dentro do buffer: informa a porcentagem da rede de drenagem de baixa resolução contida dentro de um *buffer* aplicado em torno da rede de drenagem de alta resolução. A largura do *buffer* depende da resolução da drenagem de baixa resolução, neste caso usou-se uma largura de 1,8 km (1/5 da dimensão da célula de baixa resolução). Esta técnica fornece uma indicação de proximidade entre a drenagem gerada e a de alta resolução. Ambos os critérios de distância média e *buffer* fornecem informações quantitativas da coerência espacial entre as drenagens comparadas para a bacia como um todo.
- iii. Área de drenagem: a área de drenagem acumulada derivada pelos diferentes métodos foi comparada à área extraída da drenagem de alta resolução para estimar sua acurácia. Para cada célula da grade de 9 km foi calculado o erro relativo da área de drenagem como: $\text{erro (\%)} = 100(A_{ar} - A_{br})/A_{ar}$, onde A_{br} corresponde à área de drenagem da célula e A_{ar} é o valor do pixel com área de drenagem máxima dentro de cada célula. Assim como nos critérios anteriores esta medida de concordância da drenagem tem uma incerteza associada, uma vez que é possível obter uma mesma área de drenagem com uma rede de drenagem completamente diferente.

- iv. Análise visual: é o critério mais simples que fornece uma medida qualitativa através da comparação visual da rede de drenagem de baixa resolução com a de alta resolução. Este tipo de análise permite identificar situações em que um método obteve aperfeiçoamentos ou falhas em relação ao outro. Uma rede de drenagem de baixa resolução com boa qualidade deve seguir a drenagem de alta resolução tão próximo quanto possível.

3. Aplicação à bacia dos rios Mogi-Guaçu e Pardo

A rede de drenagem de alta resolução foi determinada a partir do MNT proveniente do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), disponibilizados gratuitamente pelo CGIAR-CSI GeoPortal¹, com resolução espacial de 90 m (ou 0,000833°) para a América do Sul. A bacia de interesse localiza-se na região hidrográfica do Paraná, na bacia do Rio Grande, entre a região a nordeste do estado de São Paulo e sudoeste de Minas Gerais (Figura 1) e seus rios principais são o Mogi-Guaçu e Pardo. A bacia abrange uma área de drenagem de 35.138 km² e será referenciada como MGP. O algoritmo de propagação hidrológica (HYDRA, Coe et al. 2000) será aplicado nesta bacia, o que requer o conhecimento das direções de fluxo da célula de grade na resolução de 9 km. Os dois procedimentos de *upscaling* foram avaliados pela comparação entre a rede de drenagem de baixa resolução gerada (9 km) com a de alta resolução (90 m). No procedimento de UCEI o método COTAT+ foi aplicado para o *upscaling* da drenagem de 90 m para 900 m (escala intermediária) e desta para 9 km.

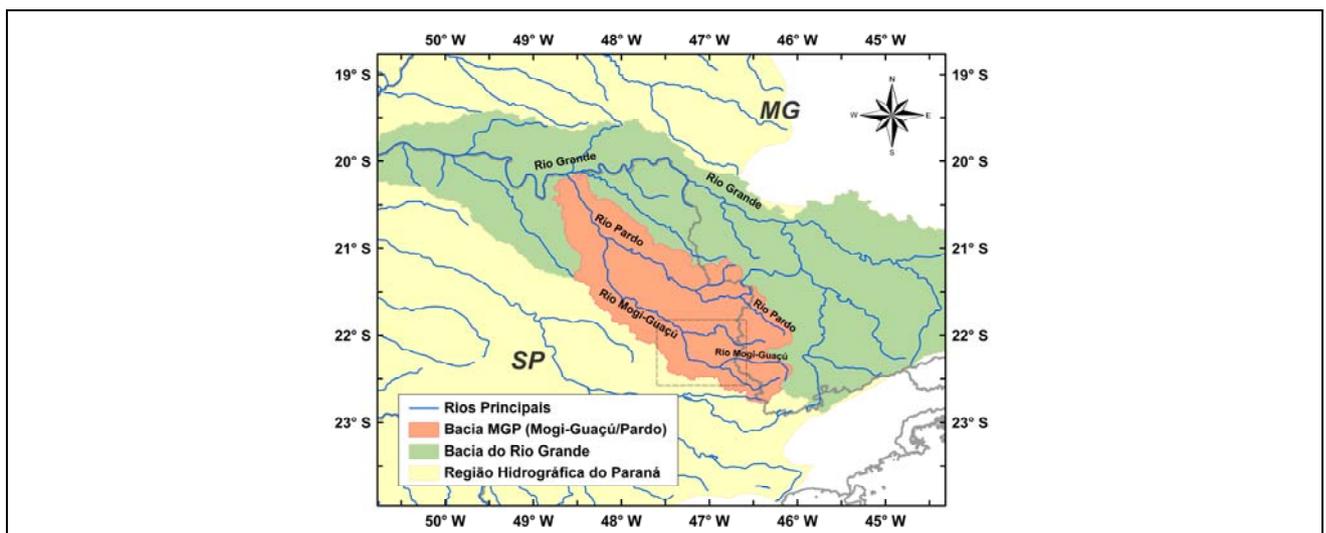


Figura 1. Localização da Bacia Mogi-Guaçu e Pardo no contexto de regiões e unidades hidrográficas do Brasil. A área pontilhada é usada na seção de resultados.

4. Resultados e Discussão

Com base nos critérios quantitativos, o resultado da comparação entre o UD e UCEI indicou que não ocorreram diferenças significativas entre eles (Tabela 1). Os valores de área de drenagem total da bacia MGP estimados usando o UD e UCEI foram muito próximos entre si e subestimaram a área de drenagem determinada na alta resolução por até 7 km² (erro de 0,02%).

Para comparar o efeito da aplicação do UCEI em relação ao UD, a análise visual teve enfoque nos casos onde as direções de fluxo geradas pelos dois procedimentos foram diferentes. Dentro da área da bacia ocorreram 30 células com direções de fluxo diferentes entre os dois métodos. Para cada uma daquelas células verificou-se qual método teve melhor

¹ <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>

desempenho, ou se ambos os métodos foram equivalentes em termos de qualidade da drenagem. Desta análise resultou que em 15 células (50%) o UCEI foi melhor na representação da direção de fluxo em relação ao UD, enquanto em 7 células (23%) o UD foi melhor na representação da direção de fluxo (Tabela 1). Em 8 células (27%) a direção de fluxo de ambos os métodos foi equivalente em termos de qualidade da drenagem.

Tabela 1. Comparação entre os dois procedimentos de *upscaling* de direções de fluxo baseada nos critérios de avaliação.

Critério	UD	UCEI
Distância média (km)	1.45	1.44
% dentro do <i>buffer</i>	63	66
Área de drenagem (km ²) (35138)*	35132	35134
Análise visual	Nº células com melhor representação da direção de fluxo em relação ao UCEI 7 (23%)	Nº células com melhor representação da direção de fluxo em relação ao UD 15 (50%)

* área de drenagem da bacia estimada com o MNT de 90m.

Para avaliar a acurácia da representação da área de drenagem, determinou-se o histograma da porcentagem de erro relativo para cada célula onde a área de drenagem estimada pelos procedimentos de *upscaling* foi diferente. Dentro da bacia MGP, 24% do total de células (109 células) apresentaram valores de área de drenagem diferentes. Áreas de drenagem inferiores a 81 km² foram excluídas desta análise já que a resolução da drenagem derivada (9 km) não poderia quantificar estas áreas, o que poderia levar equivocadamente a grandes porcentagens de erro na área de drenagem. Com isso o número efetivo de células com áreas diferentes reduziu-se para 102. A frequência de ocorrência do erro relativo de células de 9 km na Fig. 2 indica que para erros entre -10 e 0% o UCEI tem maior número de células (47) em comparação ao UD (43). Entretanto considerando a margem de erro de $\pm 40\%$ o número de células dentro deste intervalo é de 92 e 90 células para o UD e UCEI, respectivamente, o que corresponde em média a ~90% das células que apresentaram valores diferentes de área de drenagem. Dessa forma, este critério não indicou diferenças significativas entre os procedimentos de *upscaling*.

A Fig. 3 apresenta a rede de drenagem de baixa resolução gerada pelos diferentes métodos sobreposta à rede de drenagem de alta resolução para a região pontilhada na Fig. 1. Os casos onde ocorreram diferenças relevantes na representação da drenagem entre os métodos são indicados pelos círculos coloridos. A circunferência em azul claro destaca uma situação peculiar onde dois rios cruzam uma mesma célula (G3), sendo que o rio de maior importância (maior área de drenagem) percorre um caminho bastante curto dentro da célula ao contrário do outro tributário (de menor área de drenagem). Esse é um caso típico em que a rede de drenagem de baixa resolução não deve seguir a orientação do rio principal, que passa apenas muito levemente pela célula. O procedimento de *upscaling* direto (UD) não conseguiu evitar esse erro e os dois rios paralelos (linhas em cinza na Fig. 3) não foram adequadamente representados pela rede de drenagem de baixa resolução (linhas em laranja). Por outro lado, o procedimento UCEI conseguiu distinguir os dois caminhos distintos de fluxo, gerando uma drenagem de baixa resolução mais coerente (linhas em azul, Fig. 3.b). É interessante destacar que, neste caso, o pixel com máxima área de drenagem dentro da célula corresponde ao pixel contido dentro do rio que percorre um menor caminho na célula (ponto vermelho na Fig. 3.a,b). Embora a drenagem resultante do UCEI tenha sido mais coerente, o erro relativo estimado com o critério de área de drenagem (seção 2.4. iii) para a célula G3 foi de +68% e -

18% de acordo com as direções de fluxo estimadas pelos procedimentos UCEI e UD, respectivamente.

Ainda na Fig. 3, a circunferência em verde claro destaca outra situação semelhante, onde o UCEI foi apto a distinguir dois trechos de rios paralelos cruzando a mesma célula (D6). Novamente a magnitude do erro relativo estimado pelo critério de área de drenagem pelo UCEI foi maior que o obtido pelo UD.

Esses dois casos mostram que o sucesso na previsão da área de drenagem não implica necessariamente em uma rede de drenagem de boa qualidade, conforme reportado por Olivera et al. (2002), Doll e Lehner (2002) e Paz et al. (2006). A rede de drenagem calculada usando o UCEI teve maior concordância com a rede de drenagem de alta resolução para a Bacia MGP, apesar do critério de área de drenagem não ter mostrado grandes diferenças em termos de distribuição espacial do erro relativo. A inclusão de áreas indevidas contribuindo para a célula analisada e a exclusão de outras áreas pode levar a um valor próximo do correto para a área de drenagem (erros que se compensam), embora a rede de drenagem em si não esteja completamente correta. Uma inspeção visual mais detalhada da Fig. 3 revela a ocorrência deste tipo de situação. A rede de drenagem traçada pelo UD forma a sub-bacia 1 (células em tom vermelho), que inclui 4 células adicionais incorretamente (G3, F4, G4, e H4). Por outro lado, na sub-bacia 2 (células em tom de azul) não foram incluídas 4 células potenciais (E3-G3 e F4). Também ocorreram casos em que as redes de drenagem traçadas por ambos os procedimentos poderia ter sido melhor, como por exemplo, as células F8 e H4. Outro aspecto interessante entre as drenagens resultantes são as células de cabeceira (células com contorno destacado na Fig. 3) que recorrentemente diferiram quanto à direção de fluxo entre os procedimentos de *upscaling*, mas que não significam erro.

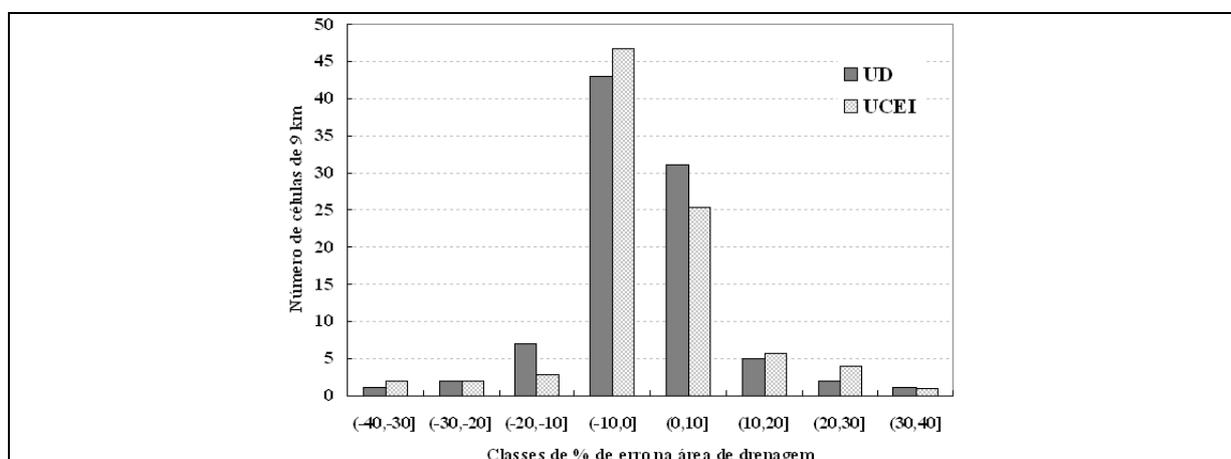


Figura. 2. Erro relativo entre a área de drenagem de alta resolução (90 m) e a área de drenagem de baixa resolução (9 km) obtida pelos dois procedimentos de *upscaling* da rede de drenagem (UD e UCEI).

5. Conclusões

Neste artigo realizou-se uma análise comparativa do uso do algoritmo de *upscaling* de direções de fluxo COTAT+ (Paz et al. 2006), adotando-se dois procedimentos: realização do *upscaling* direto (de alta para baixa resolução) e o *upscaling* em duas etapas (da resolução alta para a intermediária, e desta para a baixa resolução). As redes de drenagens derivadas para a bacia Mogi-Guaçu e Pardo na resolução de 9 km foram obtidas a partir do MNT com resolução de 90m. Para comparação das redes de drenagens produzidas pelos procedimentos de *upscaling* (UD e UCEI) com a rede de drenagem de 90 m foram utilizados critérios de avaliação que incluíram a análise de proximidade, acurácia da área de drenagem e análise visual.

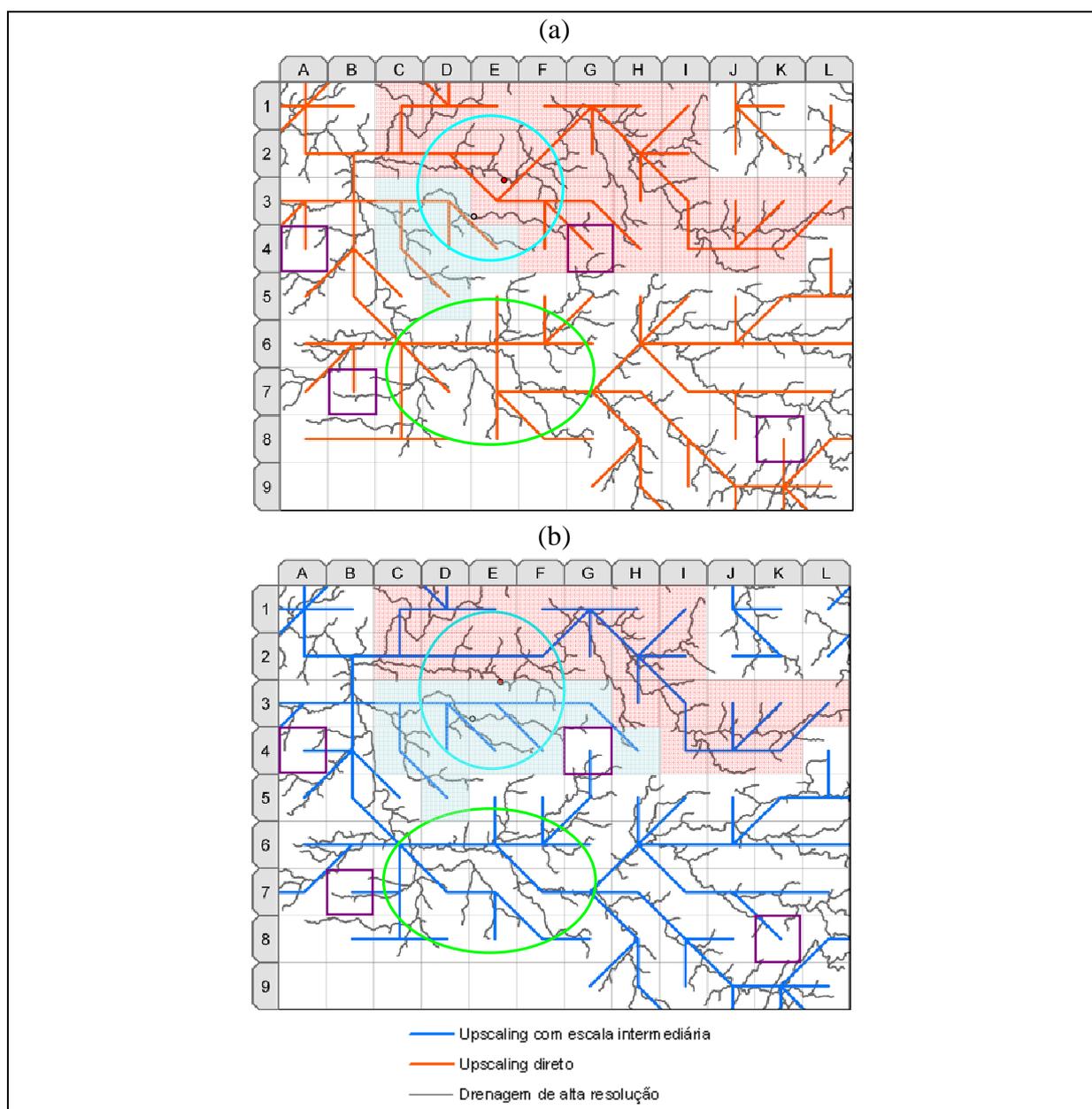


Figura 3. (a) Rede de drenagem gerada com UD e (b) rede de drenagem gerada usando UCEI. As células com contorno violeta são divisores de água. Os círculos coloridos delimitam áreas com diferenças relevantes entre as drenagens de cada método (ver discussão no texto). As células em tom vermelho e azul delimitam as sub-bacias 1 e 2. Os pontos em vermelho e azul indicam os pixels exutórios da célula E3.

Os critérios quantitativos não revelaram diferenças significativas entre os dois procedimentos de *upscaling* avaliados devido à pequena porcentagem de área da bacia em que ocorreram diferenças entre os procedimentos (~10% da área total). Para estes casos (30 células) através da análise visual quantificou-se que em 15 deles (50%) o UCEI representou melhor a direção de fluxo que o UD, enquanto em 7 casos (23%) o UD representou melhor a direção de fluxo que o UCEI. Em 8 células (27%) a direção de fluxo de ambos os métodos foi equivalente em termos de qualidade da drenagem. As situações reportadas na análise visual ressaltaram que a rede drenagem obtida com o procedimento de UCEI representou de forma mais coerente a rede de drenagem de alta resolução, particularmente na distinção de trechos

de rios paralelos cruzando a mesma célula. Desta forma sugere-se que a realização do *upscaling* com escala intermediária (UCEI) tende a produzir redes drenagem de melhor qualidade do que o *upscaling* direto (UD) para aplicações em grandes bacias.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao USGS pela disponibilização de dados do SRTM-90m. O primeiro e quarto autor agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo pelo auxílio através dos processos nº 06/50924-0 e 02/09289-9. O segundo autor agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de doutorado.

7. Referências Bibliográficas

Burrough, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**, Oxford: Clarendon Press, 1986. 194 p.

CGIAR-CSI, Void-filled seamless SRTM data V1 - 2004, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), The CGIAR Consortium for Spatial Information, Disponível em <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em 1 ago. 2006.

Coe, M.T. Modeling terrestrial hydrologic systems at the continental scale: Testing the accuracy of an atmospheric GCM. **Journal of Climate** 13, 686-704, 2000.

Davies H. N, Bell V. A.. Assesment of methods for extracting low resolution river networks from high resolution digital data. **Hydrological Sciences Journal**. In Press.

Döll, P. and Lehner, B. Validation of a new global 30-min drainage direction map, **Journal of Hydrology**, 258, p. 214-231, 2002.

Fairfield, J.; Leymarie, P. Drainage networks from grid digital elevation models, **Water Resources Research**, 27(5), p. 709-717, 1991.

Fekete, B. M.; Vörösmarty, C. J.; Lammers, R. B. Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: development, analysis, and control of error, **Water Resources Research**, 37(7), p. 1955-1967, 2001.

Garbrecht, J.; Martz, L. W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, **Journal of Hydrology**, 193, p. 204-213, 1997.

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

Liang, C.; Mackay, D. S. A general model of watershed extraction and representation using globally optimal flow paths an up-slope contributing areas, **International Journal of Geographical Information Science**, 14(4), p. 337-358, 2000.

Olivera, F.; Lear, M. S.; Famiglietti, J. S.; Asante, K. Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models, **Water Resources Research**, 38(11), 1231, 2002.

Paz, A. R.; Collischonn, W; Silveira, A. L. L. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models, **Water Resources Research**, 42, W08502, 2006. doi:10.1029/2005WR004544.

Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P.; Planchon, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, **Hydrological Processes**, 5, p. 59-79, 1991.

Reed, S. M. Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling, **Water Resources Research**, 39(9), 1238, 2003.

Singh, V.P., Frevert, D.K. 2002. **Mathematical Models of Large Watershed Hydrology**. Water Resources Publications, LLC, Colorado, Estados Unidos.

Tianqi, A.; Takeuchi, K.; Ishidaira, H.; Yoshitani, J.; Fukami, K. Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs, **Hydrological Sciences Journal**, 48(6), p. 985-997, 2003.

Wood, E.F., Lettenmaier, D., Liang, X., Nijssen, B., Wetzel, S.W., 1997. Hydrological modeling of continental-scale basins. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences** 25, 279-300.