

AVANÇOS NA AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS EM ÁREAS DE INUNDAÇÃO

A.C.V. Getirana¹; M.-P. Bonner²; J.-M. Martinez²; O.C. Rotunno Filho³; W.J. Mansur⁴

RESUMO – Este artigo apresenta um método para obter informações hidrológicas (direções de fluxo e delimitação de bacias) mais precisas em planícies de inundação próximas a rios a partir de modelos numéricos do terreno (MNT). Neste novo método, os procedimentos aproximam-se aos adotados pela abordagem conhecida como “*stream burning*” (SB), diferenciando-se na combinação de informações da distribuição espacial de áreas de inundação à rede hidrográfica. Nesse sentido, as elevações do MNT são reduzidas duplamente: nos rios, com os vetores da rede hidrográfica, e nas áreas inundadas, com as planícies de inundação. Equações potenciais ou lineares são usadas para variar as profundidades subtraídas em cada pixel que representa áreas inundadas em função da distância entre o pixel da área inundada e o pixel que representa a rede hidrográfica. Ao fim, é demonstrado que o novo método oferece uma melhor qualidade na obtenção de direções de fluxo e de delimitação de bacias que o método tradicional SB, quando se trata de áreas de inundação em grandes bacias.

ABSTRACT – This paper aims to present a method to obtain drainage directions and consequently more accurate watershed information from digital elevation models (DEM) in flooded areas close to rivers. In this new approach the procedures are similar to the ones adopted in the standard “*stream burning*” (SB) method. The main difference between them is the combination of spatial distribution of flooded areas to the digital channel network. In this sense, the DEM is burned twice: in the main rivers with the channel network and in the inundated areas with the floodplains. Potential or linear equations are used to vary the deepness burned in each pixel representing the inundated area according to the distance to the channel network vectors. Finally, it is shown that the new method offers an improved accuracy in obtaining drainage directions and watershed information when compared to the traditional SB approach with respect to flooded areas in large basins.

Palavras-chaves: Modelo numérico do terreno, áreas de inundação, delimitação de bacias.

1. INTRODUÇÃO

A definição de direções de fluxo de rios e o delineamento de vertentes são os primeiros e principais passos para se iniciarem estudos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. O acelerado

¹ Aluno de doutorado cotutelle da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil e LMTG/UPS, Toulouse, França. augusto@hidro.ufrj.br

² Pesquisador (a) do LMTG, IRD, 14, Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, França. . E-mail mariepbo@yahoo.fr; martinez@ird.fr

³ Professor adjunto da COPPE/UFRJ, PEC, Cidade Universitária, CT, CEP 21941-590; Caixa Postal: 68.540, Rio de Janeiro. E-mail otto@coc.ufrj.br

⁴ Professor titular da COPPE/UFRJ, PEC, Cidade Universitária, CT, CEP 21941-590; Caixa Postal: 68.540, Rio de Janeiro. E-mail webe@coc.ufrj.br

desenvolvimento de algoritmos eficientes e o uso de modelos numéricos do terreno (MNTs) adquiridos por satélites facilitam a aquisição de tais informações. Entretanto, um MNT não está imune a erros originados por aproximações e imageamento do relevo além da má interpretação de características da superfície terrestre. Outra fonte de erros na aquisição de informações hidrológicas a partir de MNTs é a limitação dos algoritmos de processamento de modelos topográficos no momento de definir direções em superfícies planas. Estes dois problemas podem causar erros no processo de obtenção de informações da bacia hidrográfica, uma vez que eles não podem representar comportamentos reais da superfície terrestre, e, quando podem, a direção de drenagem não é bem definida por algoritmos tradicionais.

A delimitação de bacias hidrográficas e a obtenção de redes de drenagem a partir de MNTs dão-se início com a definição de direções de fluxo. A abordagem tradicional para obter direções de fluxo é o conhecido D8. Essa abordagem parte do princípio que uma célula de um MNT gera escoamento para apenas um de seus 8 vizinhos. Nesse sentido, a partir de uma janela 3x3, busca-se para cada célula do MNT, seu vizinho de que resulte na maior declividade, atribuindo-lhe essa mesma direção como a direção de fluxo. Outros métodos que definem múltiplas direções de escoamento de uma célula (Tarboton, 1997; Seibert e McGlynn, 2007) já foram propostos na literatura. Estes métodos melhoram a observação da dispersão do escoamento superficial e a aquisição de algumas características hidrológicas e geomorfológicas, no entanto, tratando-se de delimitações de bacias hidrográficas para a modelagem hidrológicas, recomenda-se a utilização do tradicional D8.

Mas quando não se dispõe de outra fonte de informação da superfície terrestre, o D8 é incapaz de fornecer direções de drenagem coerentes em superfícies planas. Métodos baseados no D8 têm sido desenvolvidos para melhorar a definição das direções de fluxo nestes tipos de superfície. Fairfield e Leymarie (1991) propuseram o uso de um fator aleatório (o chamado Rho8) para evitar paralelismos de cursos de rios em superfícies planas causados pelo determinismo do D8. Garbrecht e Martz (1997) atribuíram declividades elementares às células inseridas em uma superfície plana, induzindo o escoamento das cabeceiras dessas regiões em direção aos seus exutórios. Zhu et al. (2006) propuseram um método iterativo de busca por células vizinhas às células do tipo exutório. A cada iteração, busca-se as células vizinhas, em seguida, as células contíguas às vizinhas, e assim por diante. O resultado é equivalente a uma distribuição seguindo critérios de mínimas distâncias. Entretanto, estes métodos permanecem imprecisos enquanto não houver outra fonte de informação de cobertura do solo para validar tais resultados.

Na tentativa de corrigir tais problemas, um método conhecido como “*stream burning*” (SB) foi desenvolvido para determinar direções de fluxo com melhor precisão a partir de um MNT. Esse método é baseado na conjunção da rede hidrográfica digitalizada com o MNT. Essa abordagem,

primeiramente introduzida por Hutchinson (1989), propõe o uso de informações suplementares de redes de cursos de água no MNT para forçar o fluxo pelos pixels que correspondem à rede de linhas de drenagem.

O método SB pode ser sumarizado em alguns passos: (a) rasterização de uma rede hidrográfica digital (vetorizada); (b) identificação das células no MNT por onde passa a rede hidrográfica rasterizada; e (c) modificação (redução) das elevações das células identificadas no MNT para garantir que o fluxo escoará em direção ao(s) exutório(s). Essa abordagem já apresentou bons resultados com a aplicação dessa abordagem já foram apresentados por trabalhos como o de Hutchinson (1989) e Saunders (1999). Mais recentemente, Turcotte et al. (2001) utilizaram o conhecimento prévio dos percursos de rios e lagos para melhorar a definição de direções de fluxo a partir de MNTs. Os autores propuseram a definição automática a partir da abordagem D8 nas células onde não havia superposição com rios e lagos para, em seguida, forçar o fluxo nos cursos de água conhecidos, sem haver modificações no MNT.

No entanto, como será mostrado neste trabalho, existem casos encontrados em superfícies planas e/ou inundadas que, mesmo utilizando o método “*stream burning*”, a direção de drenagem e a delimitação de bacias ainda apresentam imprecisões. Nesse sentido, este artigo apresenta uma nova abordagem que utiliza o prévio conhecimento da distribuição espacial de áreas de inundação definidas, por exemplo, a partir de imagens de satélite classificadas, acopladas à rede hidrográfica, para obter melhores resultados no processamento de MNTs. O exemplo analisado é a bacia do rio Demeni. Esse rio é afluente do rio Negro, que está localizado na bacia Amazônica. A região na qual essa bacia está inserida é caracterizada pelas amplas extensões de áreas periodicamente e permanentemente inundadas, causadas por um relevo extremamente plano.

O desenvolvimento, descrição e aplicação de abordagens para extrair informações hidrológicas de MNTs já estão bem documentados em vários trabalhos na literatura (O’Callaghan e Mark, 1984; Palacios-Vélez e Cuevas-Renaud, 1986; Jenson e Domingue, 1988; Fairfield e Leymarie, 1991; Tribe, 1992; Martz e Garbrecht, 1995; Wang e Yin, 1998; Jones, 1998; Jones, 2002). Dessa forma, uma descrição do processamento de MNTs visando a extração dessas informações torna-se desnecessária neste trabalho. O artigo é dividido nas seguintes seções: apresentação do método proposto e sua base teórica; descrição da área de estudo e suas principais características hidrológicas; aplicação do método à área de estudo e análise e comparações entre os resultados obtidos com o método proposto e outras abordagens já existentes; e conclusões e comentários a respeito do método proposto.

2. MÉTODO PROPOSTO

A nova abordagem apresentada neste artigo é baseada nos fundamentos do método SB tradicional, diferenciando-se na utilização do prévio conhecimento da distribuição espacial de áreas de inundação, que pode ser adquirido a partir de mapas cartográficos ou ainda de imagens de satélite. Nesse sentido, objetiva-se forçar as direções de fluxo reduzindo a elevação de células do MNT sob a rede hidrográfica digital e reduzir também a elevação das células do MNT em função da distribuição espacial das áreas de inundação. A redução de elevação nas áreas de inundação é realizada em função da distância entre cada célula nessa área e a célula mais próxima que represente a rede hidrográfica. Para simplificar nomenclaturas, a partir de agora esses dois tipos de célula serão chamados de P_R (células na rede hidrográfica) e P_{FA} (células nas áreas de inundação), conforme apresentado na Figura 1.

A redução de elevação de cada P_{FA} varia em função da distância de P_R . Essa propriedade é responsável pela configuração do vale gerado no entorno dos rios. Após toda a aquisição de dados (distribuição espacial das áreas de inundação, rede hidrográfica e MNT), as fases de pré-processamento para a modificação do MNT são as seguintes:

- transformada de distâncias;
- cálculo de profundidades;
- redução de elevações.

Essas três fases serão descritas em detalhe nas próximas seções.

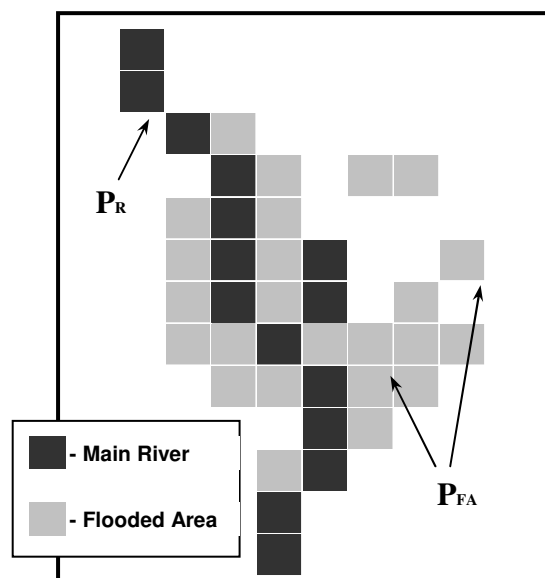


Figura 1 – Representação esquemática de pixels em rio (P_R) e pixels em área de inundação (P_{FA}).

2.1. Transformada de distâncias

Uma transformada de distâncias (TD) é uma operação que converte uma imagem binária em uma imagem de níveis de cinza, onde todos os pixels possuem um valor correspondente à mínima distância entre ele mesmo e outro pixel de referência. Algoritmos que calculam a transformada da distância Euclidiana, que fornece o valor real da distância Euclidiana entre centros de pixels, já foram publicados por Danielsson (1980) e Yamada (1984), mas eles são computacionalmente complexos e desnecessários para objetivos como os propostos neste trabalho. Dessa forma, torna-se necessário o uso de algoritmos que consideram somente uma pequena vizinhança por vez, mas que ainda fornecem uma aproximação razoável da distância Euclidiana (Borgefors, 1986).

TDs que usam apenas uma pequena vizinhança por vez são baseadas na idéia que distâncias globais na imagem podem ser aproximadas pela propagação de distâncias locais, ou seja, distâncias entre pixels vizinhos. Nesse sentido, diferentes valores têm sido propostos para a e b (Figura 2) na literatura: $a=1$ e $b=\text{infinito}$, ou $a=1$ e $b=1$, (Rosenfeld e Pfaltz, 1966); $a=1$ e $b=\sqrt{2}$ (Montanari, 1968); $a=2$ e $b=3$ (Rosenfeld e Kak, 1982); e $a=3$ e $b=4$ (Borgefors, 1984). Neste trabalho, foram adotados os valores de $a=1$ e $b=\sqrt{2}$.

$+b$	$+a$	$+b$
$+a$	0	$+a$
$+b$	$+a$	$+b$

Figura 2 – Janela 3x3 e distâncias a e b (Borgefors, 1986).

2.1.1. Descrição matemática

Dado S como o conjunto de todos os pixels p em uma imagem, FA como o conjunto de pixels caracterizados como P_{FA} , onde $FA \subset S$, e R como o conjunto de pixels caracterizados como P_R , onde $R \subset S$. Para cada $p(x,y) \in FA$, é calculado um valor de distância $\rho(x,y)$ entre p e o $p_i(x,y) \in R$ mais próximo, com relação à função de distância d de acordo com a equação (1).

$$\forall (x,y) \in FA: \rho(x,y) = \min_{(x_i,y_i) \in R} d[(x,y)(x_i,y_i)] \quad (1)$$

O conjunto de todos $\rho(x,y)$ é chamado de mapa de distâncias (Borgefors, 1986; Paglieroni, 1992; Ogniewicz e Kübler, 1995). A Figura 3 apresenta um exemplo de cálculo de $\rho(x,y)$ (ou simplesmente d_{min}), tendo os pixels em preto como referências.

0	1	2	1	0
1	1.41	2.41	1.41	1
2	2.41	2.83	2.41	2
1	1.41	2.41	1.41	1
0	1	2	1	0

Figura 3 – Exemplo de um Mapa de Distância.

Seguindo a descrição anterior, a Figura 4 mostra um mapa de distâncias de um rio esquemático com áreas de inundação, conforme já foi apresentado na Figura 1. Verifica-se que é atribuído a cada P_{FA} o valor da menor distância contínua entre ele mesmo e um P_R . Por exemplo, o pixel marcado com um círculo na Figura 4 recebe o valor $d_{min}=4,24$, porque a menor distância contínua entre ele mesmo e um P_R é a definida pela flecha. O outro caminho definido pela flecha cruzada não é um caminho viável porque não é contínuo. Essa é a razão pela qual os dois pixels sem conexão com outro P_R não receberam quaisquer valores e foram eliminados do processo. Esse filtro evita mudanças prejudiciais no MNT, pois considera como célula P_{FA} representativa somente aquelas com ligações às células P_R , conforme apresentado.

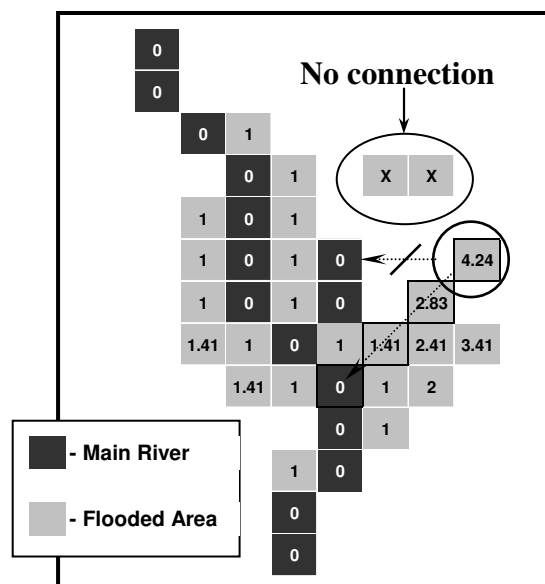


Figura 4 – Mapa de distâncias de um rio esquemático com áreas de inundação.

2.2. Cálculo de profundidades

Como o objetivo desse processo é gerar vales para todas as seções transversais de trechos de rios contornados por áreas de inundação, as profundidades dos P_{FA} devem variar inversamente com os valores de d_{min} . Nesse sentido, diversas equações podem ser usadas para alcançar esse objetivo. Neste trabalho, são propostos dois tipos de equações: uma potencial e outra linear.

Dado o mesmo conjunto $\rho(x,y)$ correspondendo ao mapa de distâncias, o cálculo da profundidade $h(x,y)$ a ser reduzida do MNT pode ser representada pelos seguintes sistemas de equações:

$$\begin{cases} h_p = H \text{ if } d_{\min} = 0 \\ h_p = H \times C_1 \times (1/d_{\min})^{C_2} \text{ if } d_{\min} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} h_l = H \text{ se } d_{\min} = 0 \\ h_l = H \times C_1 - d_{\min} \times C_2 \text{ se } H \times C_1 - d_{\min} \times C_2 > 0 \text{ e } d_{\min} > 0 \\ h_l = 0 \text{ se } H \times C_1 - d_{\min} \times C_2 \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

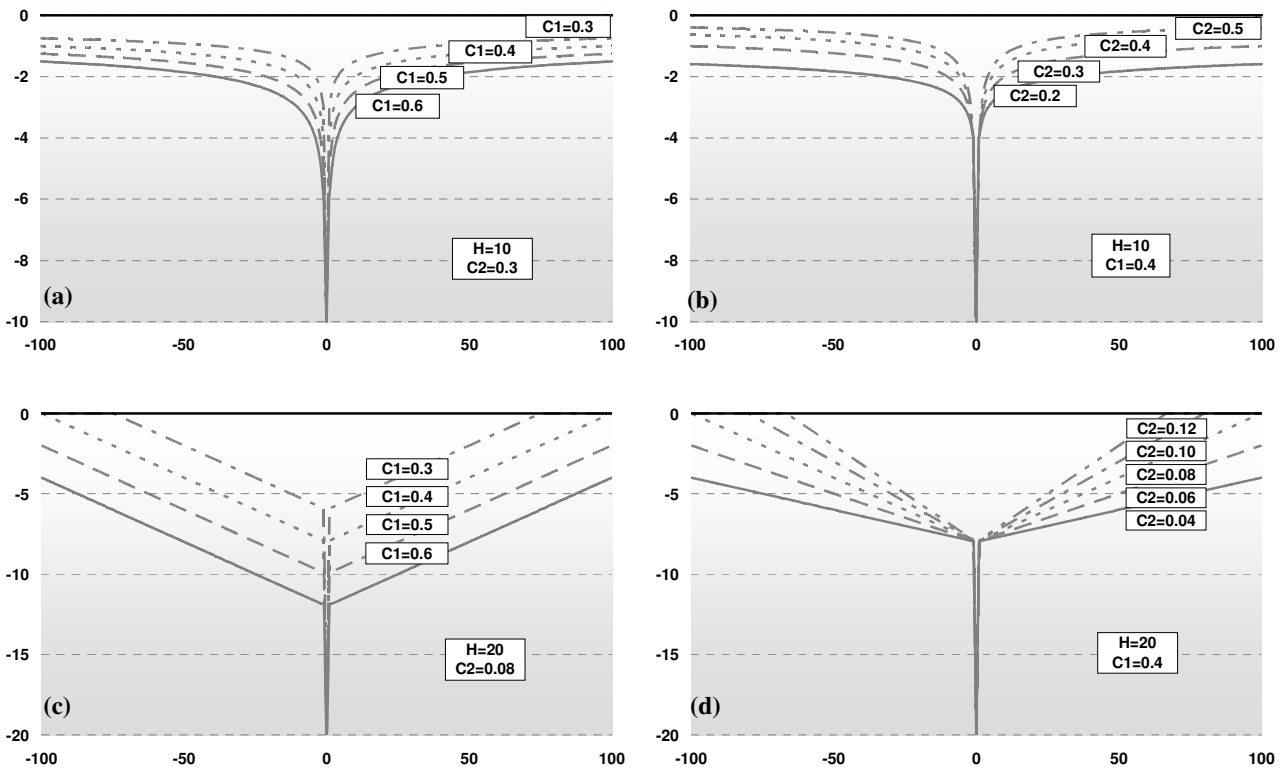


Figura 5 – Representação das seções transversais de vales criados em superfícies planas com o método proposto: (a) equação potencial com $H=10$ e $C_2=0,3$ (fixos) e variações de C_1 ; (b) equação potencial com $H=10$ e $C_1=0,4$ (fixos) e variações de C_2 ; (c) equação linear com $H=10$ e $C_2=0,08$ (fixos) e variações de C_1 ; (d) equação linear com $H=10$ e $C_1=0,4$ (fixos) e variações de C_2 .

O sistema de equações (2) corresponde à variação de profundidade $h(x,y)$. Neste caso, é chamada de h_p em função de uma potência da inversa de d_{\min} . O sistema de equações (3) representa a variação linear de $h(x,y)$, ou, neste caso, h_l em função de d_{\min} . C_1 e C_2 são coeficientes a serem definidos e H é a profundidade constante reduzida em todos os P_R com o método tradicional SB. As

seções transversais obtidas por cada sistema de equações são apresentadas na Figura 5. Nesses casos, os valores de h_p foram subtraídos do nível zero.

Usando os sistemas de equações (2) e (3) com $H=10$ e coeficientes $C_1=0,5$ e $C_2=0,3$ no exemplo apresentado na Figura 3, chega-se aos resultados apresentados na Figura 6. Os pixels em preto são considerados como P_R e os em tons de cinza são assumidos como P_{FA} .

10	5.0	4.1	5.0	10	10	4.7	4.4	4.7	10
5.0	4.5	3.8	4.5	5.0	4.7	4.6	4.3	4.6	4.7
4.1	3.8	3.7	3.8	4.1	4.4	4.3	4.2	4.3	4.4
5.0	4.5	3.8	4.5	5.0	4.7	4.6	4.3	4.6	4.7
10	5.0	4.1	5.0	10	10	4.7	4.4	4.7	10

(a) (b)

Figura 6 – Cálculo de profundidades do exemplo na Figura 3 usando: (a) sistema de equações (2); e (b) sistema de equações (3). Para ambos os sistemas de equações, $H=10$, $C_1=0,5$ e $C_2=0,3$.

2.3. Processo de ‘*Burning*’ em áreas de inundação

Considerando que as matrizes das Figuras 3 e 6 representam superfícies planas com elevação constante de 10 metros, o processo de “*burning*” em áreas de inundação produz as novas elevações apresentadas na Figura 7.

0.0	5.0	5.9	5.0	0.0	0.0	5.3	5.6	5.3	0.0
5.0	5.5	6.2	5.5	5.0	5.3	5.4	5.7	5.4	5.3
5.9	6.2	6.3	6.2	5.9	5.6	5.7	5.8	5.7	5.6
5.0	5.5	6.2	5.5	5.0	5.3	5.4	5.7	5.4	5.3
0.0	5.0	5.9	5.0	0.0	0.0	5.3	5.6	5.3	0.0

(a) (b)

Figura 7 – Resultados do processo de “*burning*” em áreas de inundação considerando uma superfície plana com 10 metros de elevação reduzida com as elevações das figuras 6 (a) e (b), respectivamente.

3. ESTUDO DE CASO

O caso analisado é a bacia do rio Demeni. Esse rio está localizado na floresta Amazônica e é um afluente do rio Negro. Duas estações fluviométricas estão instaladas nesse rio (estações de Ajuricaba e Jalauaca). A região onde se localiza o trecho inferior do rio é caracterizada pelas grandes extensões de áreas planas ou de baixas declividades, com regiões periodicamente e

permanentemente inundadas, tornando a definição automática de direções de fluxo um processo altamente sujeito a inconsistências e incertezas.

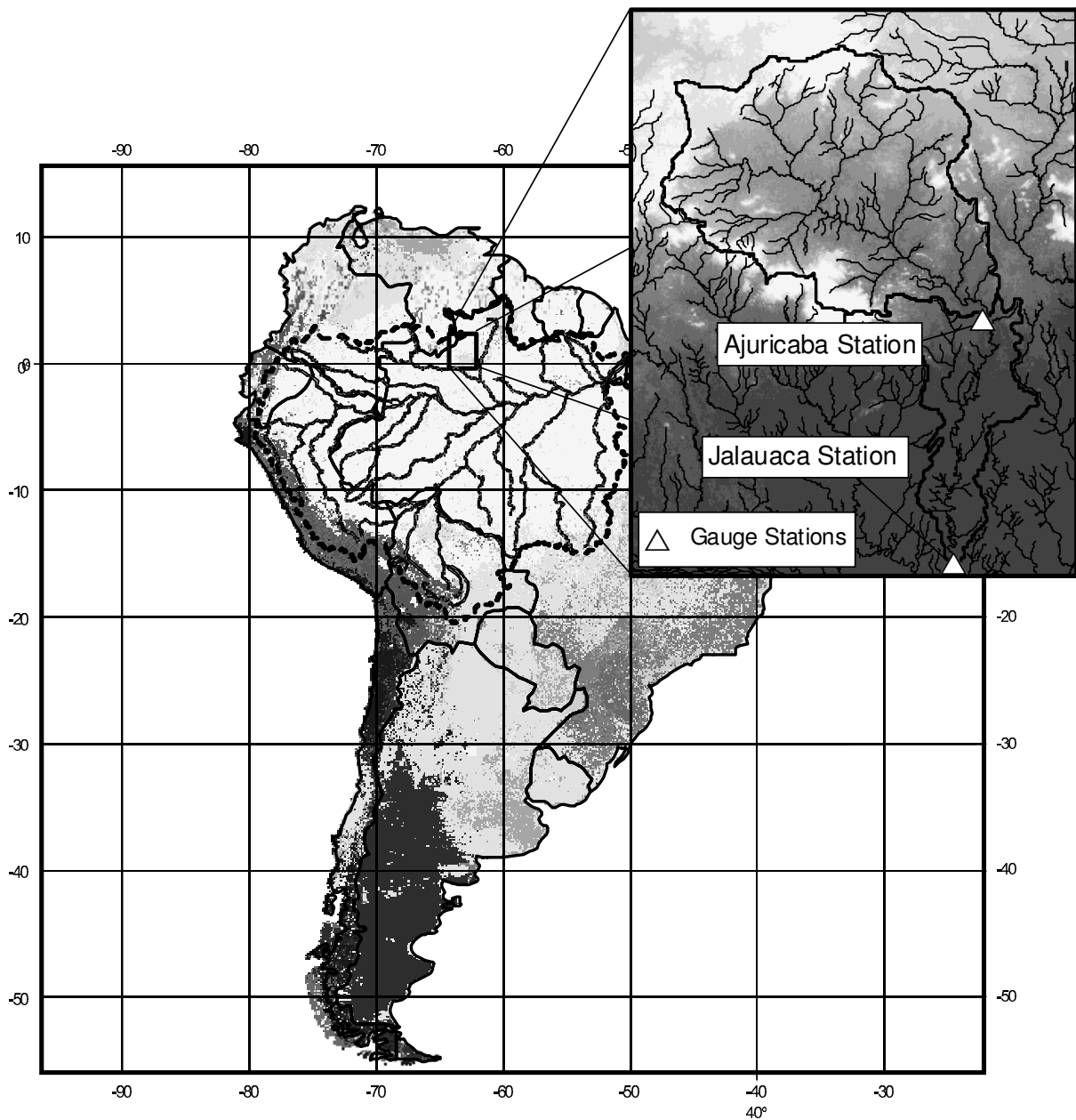


Figure 8 – Localização geográfica da área de estudo. No detalhe, a rede hidrográfica digital, as localizações das estações fluviométricas e a delimitação de bacias resultantes do processamento do MNT GTOPO30.

As estações fluviométricas estão localizadas nas coordenadas (-62.62E, 0.88N) e (-62.76E, 0.30N), conforme exibido na Figura 8. Ambas estão sob a responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo que a primeira é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

(CPRM), e a outra está atualmente desativada. As vazões médias nessas estações são de 490 m³/s na estação de Ajuricaba e 525 m³/s na estação de Jalauaca.

3.1. Aquisição da rede hidrográfica digital

De acordo com publicações de delimitações de bacias na Amazônia (HiBam, 2007), as áreas de contribuição para as estações são de aproximadamente 17.900 km² para a estação de Ajuricaba e 23.500 km² para a estação de Jalauaca. Esses valores foram obtidos a partir da delimitação de bacias adquirida pelo processamento do MNT GTOPO30 modificado por SB com uma rede hidrográfica digital resultante da vetorização de rios identificados nos mosaicos JERS-1 de 1995/1996 (Seyler *et al.*, 1999; Muller *et al.*, 1999; 2000). Esse MNT é uma grade com resolução de aproximadamente 1 km, desenvolvido pelo US Geological Survey Eros Data Center (Sioux Falls, Sioux, Dakota).

A mesma rede hidrográfica digital foi utilizada neste trabalho. Entretanto, algumas correções foram realizadas, como eliminação de rios inexistentes e reposicionamento de todos os vetores. A imagem original do JERS-1 de 1995, correspondente à área de estudo, e o resultado desse processo são ilustrados na Figura 9 como, respectivamente, “1995 JERS- Mosaic” 1 e “Digital Channel Network”. A rede hidrográfica digital e as delimitações de bacias para toda a bacia Amazônica está disponível gratuitamente em HiBAm (2007).

3.2. Extração de Áreas de Inundação a partir de Imagens Classificadas

A distribuição espacial das áreas de inundação foi obtida a partir da classificação dos mosaicos multi-temporais JERS-1. Trata-se de 2 mosaicos de imagens de todo o norte da América do Sul levantadas pelo satélite Japonês SARS JERS-1 de banda L operada pela *Japanese Space Agency* como parte do projeto *Global Rainforest Mapping*. As imagens foram levantadas nos meses de outubro e novembro de 1995, no período de águas baixas e, em seguida, entre os meses de maio e julho de 1996, no período de cheias, tendo uma resolução espacial de 100 metros. Essa sazonalidade dos mosaicos possibilita uma classificação de maneira a identificar regiões sazonalmente e permanentemente cobertas por águas. A descrição completa do processo de classificação pode ser encontrada em Martinez e Le Toan (2007) e Martinez *et al.* (2007). Resumidamente, a classificação ficou restrita a um simples, mas robusto classificador baseado nos limiares de cada quadro do mosaico para se obter classes pré-definidas. Regras de decisão da classificação tiveram origem na análise de resultados de retroespalhamento e na utilização de valores relatados na literatura para o meio ambiente em questão (Hess *et al.*, 1995; Hess *et al.*, 2003; Martinez e Le Toan, 2007; Saatchi *et al.*, 2000).

O classificador atribui um estado para cada pixel de acordo com a condição da inundação: nunca inundado; ocasionalmente inundado; e permanentemente inundado. Ele também fornece o tipo de cobertura de áreas abertas: superfície permanentemente coberta por água; vegetação rasteira; cerrado; e floresta. Por exemplo, serrado ocasionalmente inundado é seco no período de águas baixas mas inundado na época de cheia. Essa combinação resulta na classificação de 7 temas com algumas combinações de tipo de cobertura do solo excluídas: áreas de superfície permanentemente cobertas por água correspondem exclusivamente às áreas permanentemente inundadas sem vegetação exposta; vegetação rasteira permanentemente inundada é, por definição, uma superfície permanentemente coberta por água; vegetação rasteira nunca inundada é combinada à classe de cerrado nunca inundado; cerrado permanentemente inundado não é considerado, uma vez que esse tipo de cobertura do solo não é freqüente na bacia Amazônica (Junk, 1993). As classes podem ser numeradas na seguinte ordem:

1. Superfície permanentemente coberta por água;
2. Floresta ocasionalmente inundada;
3. Floresta nunca inundada;
4. Cerrado nunca inundado;
5. Vegetação rasteira ocasionalmente inundada;
6. Floresta permanentemente inundada;
7. Cerrado ocasionalmente inundado.

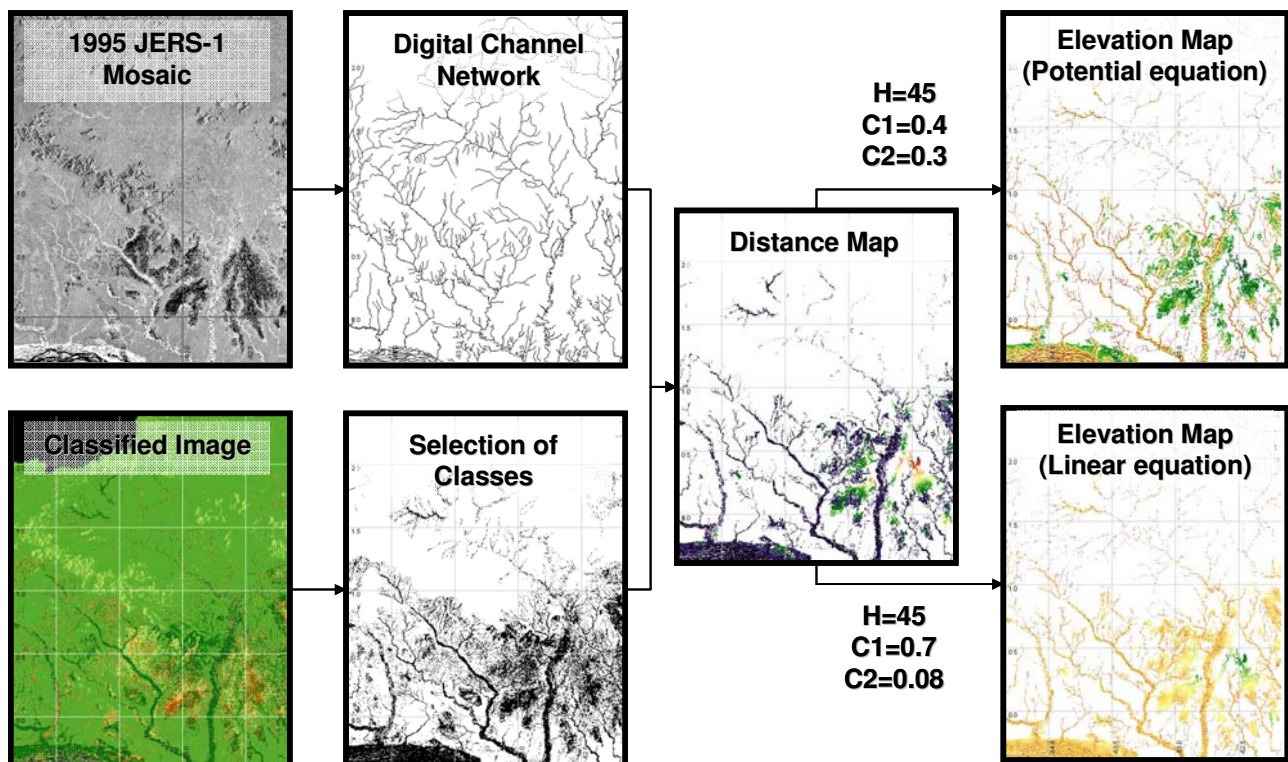


Figura 9 – Esquema para a aquisição dos mapas de distância e elevações na área de estudo.

De acordo com Martinez et al. (2007), a classificação foi validada com uma precisão superior a 90% para áreas de florestas e 70% para vegetação rasteira e cerrado devido à baixa sensibilidade da banda L a baixas vegetações e superfícies suaves. A imagem classificada correspondente à área de estudo é apresentada na Figura 9 como imagem classificada (“*Classified Image*”).

As áreas inundadas foram, então, definidas como todas as classes que representam a presença de água sazonal ou permanente na imagem, ou seja, 1, 2, 5, 6 e 7. Ajustes manuais foram realizados na classificação para corrigir algumas deficiências ocorridas no momento da classificação automática. O resultado final desse processo está apresentado na Figura 9 como seleção de classes (“*Selection of Classes*”). Essa é uma imagem binária com valores igual a 1 para P_{FA} e zero para outros pixels.

Ao interpretar os resultados da classificação da imagem do SAR multitemporal obtidos por Martinez e Le Toan (2007), pode-se notar que 10,3% da bacia incremental da estação de Jalauaca, ou seja, a área da bacia entre as duas estações fluviométricas, está permanentemente coberta por água. Essa área aumenta para 34,7% durante o período de cheia. A bacia referente à estação de Ajuricaba tem as proporções de 2,0% e 3,1%, respectivamente. A Tabela 1 apresenta alguns números a respeito da bacia.

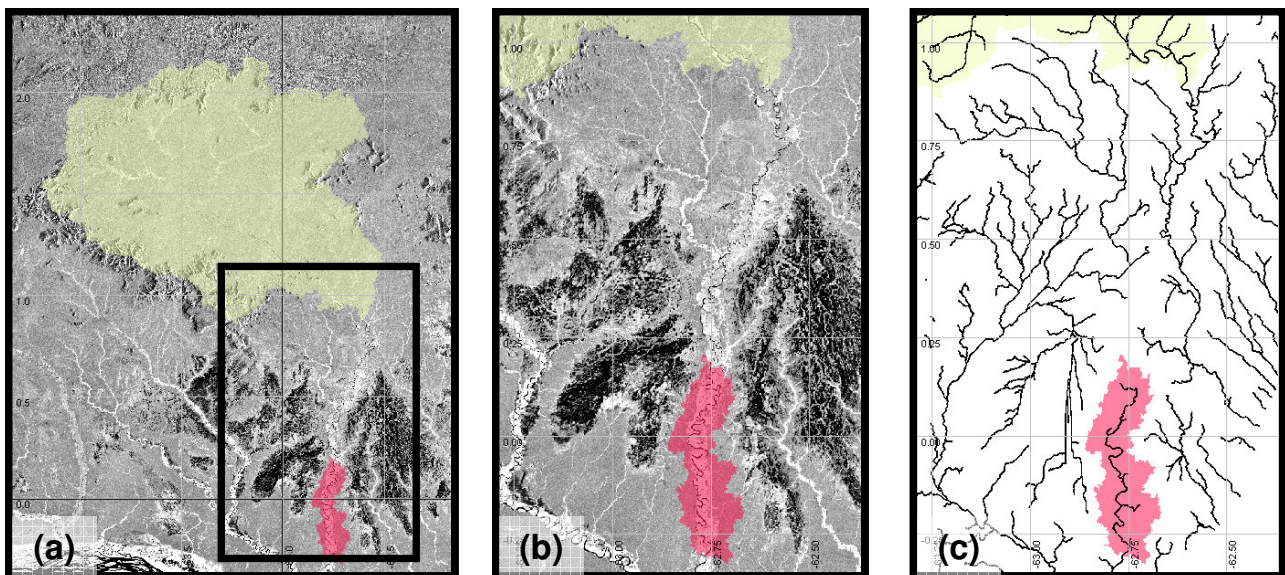


Figura 10 – Resultados do processamento do MNT original: (a) delimitação das bacias; (b) detalhe da delimitação das bacias na área de inundação; (c) detalhe da rede hidrográfica gerada na área de inundação a partir do método D8 (área mínima de 25 km²).

Os problemas trazidos com o alto percentual de superfície coberta com água na bacia incremental entre as duas estações são confirmadas com os resultados do processamento do MNT

original (definição das direções de fluxo e delimitação das bacias). Comparando o mosaico JERS-1 1995 à rede hidrográfica resultante do processamento do MNT original, percebe-se que o MNT orienta o rio para a direção sudeste, em vez de seguir para o sul (Figura 10-c), e, conseqüentemente, gera uma delimitação de bacias equivocada. A partir de agora, toda a atenção será dada à região no retângulo em detalhe na Figura 10-a.

Tabela 1 – Áreas inundadas e percentuais de cada bacia incremental.

Estação	Código	Área Total ¹ (km ²)	Área Incremental ¹ (km ²)	Área Inundada ² (estiagem)		Área Inundada ² (cheia)	
				km ²	(%)	km ²	(%)
Ajuricaba	14440000	17.127	17.127	339	2,0	526	3,1
Jalauaca	14450000	22.852	5.725	559	10,3	1.988	34,7

¹ Áreas extraídas da delimitação de bacias disponíveis em Hibam (2007).

² Valores correspondentes às áreas de drenagem incrementais de cada estação fluviométrica

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de distâncias é calculado acoplando-se os mapas da rede hidrográfica rasterizada e de classes selecionadas e adotando-se os conceitos descritos na seção 3.1. Segundo a descrição do método e aplicando os sistemas de equações (2) e (3), chega-se a dois diferentes mapas de elevação, conforme apresentado no fim do esquema da Figura 9.

Os coeficientes C_1 e C_2 foram definidos por um processo de tentativa e erro, mantendo-se um valor constante de H igual a 45 metros em ambos os sistemas de equações. Os valores dos mapas de elevação foram reduzidos do MNT original e dois MNTs modificados foram criados. Em seguida, esses dois MNTs foram submetidos ao processamento tradicional de MNTs para aquisição de informações hidrológicas, havendo primeiramente a correção de depressões, segundo o método proposto por Planchon e Darboaux (2001) combinado com a atribuição de declividades elementares às superfícies planas em função das diferenças entre as elevações mais altas nas margens da região e a elevação do potencial exutório (Martz e Garbrecht, 1995; Garbrecht e Martz, 1997). Os processos de definição de direção de fluxo e delimitação de bacias foram realizados segundo os procedimentos descritos por Jenson e Domingue (1988). Os resultados finais foram comparados com os resultados adquiridos a partir do MNT original e do MNT original + método SB, usando-se a rede hidrográfica corrigida.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos com os quatro MNTs: (a) MNT original; (b) MNT + método SB; (c) MNT + novo método (equação potencial); e (d) MNT + novo método (equação linear). Fica claro que o MNT original resultou em uma delimitação completamente

inconsistente e não-representativa da realidade, pois o rio foi dividido em dois diferentes. A área da bacia incremental resultante foi de 679 km². O MNT + método SB conservou apenas os rios considerados na rede hidrográfica digital e resultou em uma bacia restrita aos pixels mais próximos à rede hidrográfica, com uma área incremental de 3.763 km². Por outro lado, os outros dois resultados mostram um considerável aumento na área da bacia e uma definição de direções de fluxo mais precisa. No caso do MNT + novo método (equação linear), que resultou em uma área incremental de 5.057 km², pode-se verificar que houve um aumento da área maior que 6 vezes ao comparar ao MNT original e de 34% ao comparar à área obtida pelo MNT + método SB.

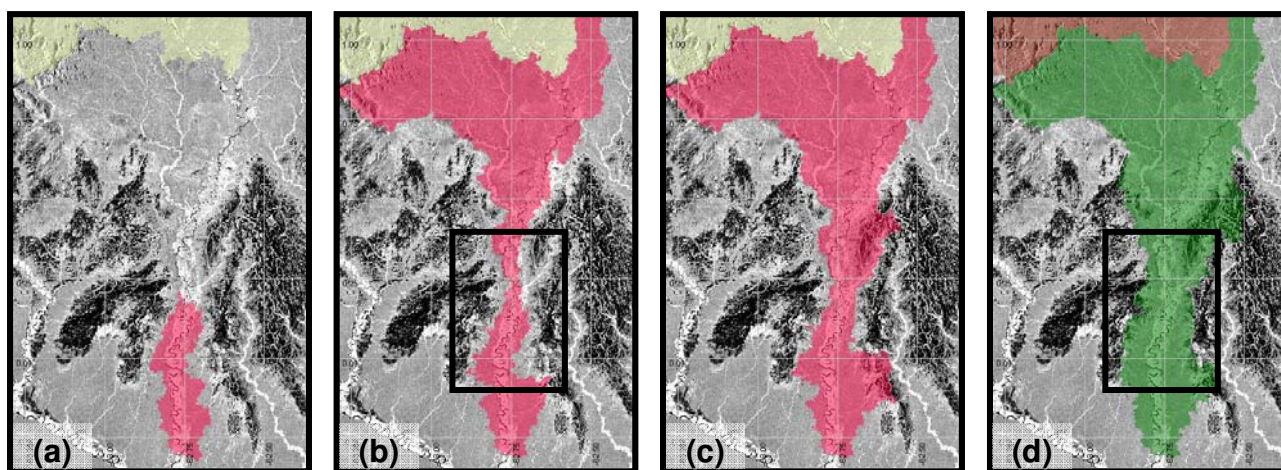


Figura 11 – Comparação de delimitações de bacias obtidas por: (a) MNT original; (b) MNT + método SB; (c) MNT + novo método (equação potencial); e (d) MNT + novo método (equação linear).

Uma análise qualitativa dos resultados pode ser feita observando-se as áreas delimitadas nos retângulos da Figura 11 e comparando-as à imagem do mosaico JERS-1 1995. Pode-se observar na Figura 12 que várias áreas inundadas não foram incluídas na bacia adquirida com o MNT + método SB, mas foram incluídas no resultado do MNT + novo método (equação linear). As Figuras 12-c/d demonstram melhor o efeito da utilização dos resultados da classificação, mostrando a distribuição das áreas consideradas como de inundação, já excluídos os pixels sem conexão, a delimitação da bacia com MNT + método SB cortando a grande parte das áreas de inundação diretamente conectadas ao rio principal (Figura 12-c) e a delimitação com MNT + novo método (equação linear) que foi capaz de compreender todas estas áreas (Figura 12-d).

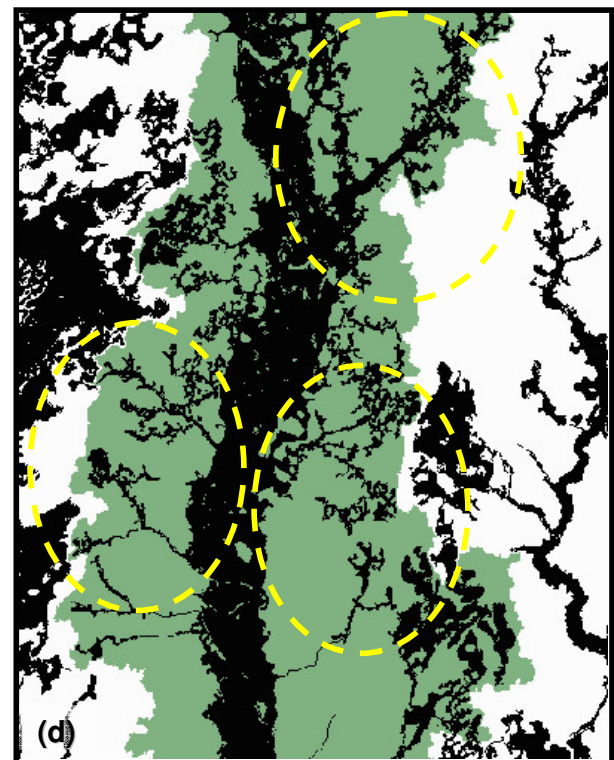
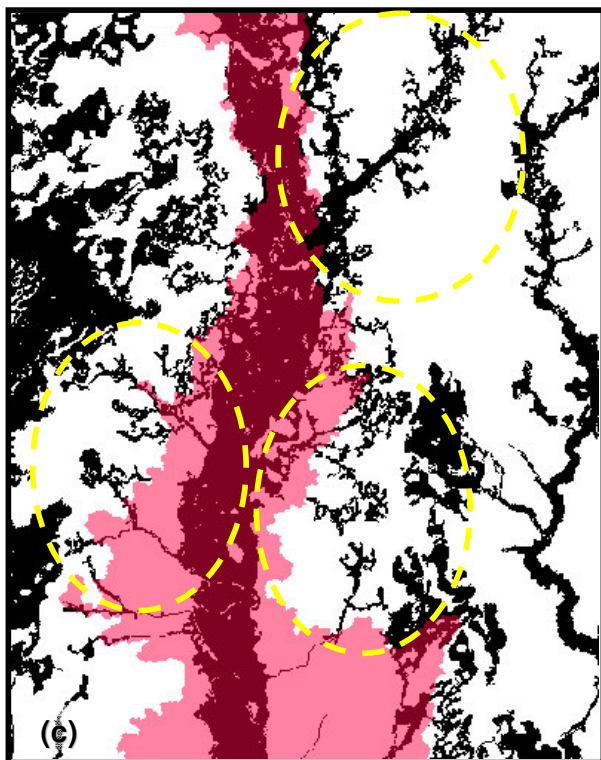
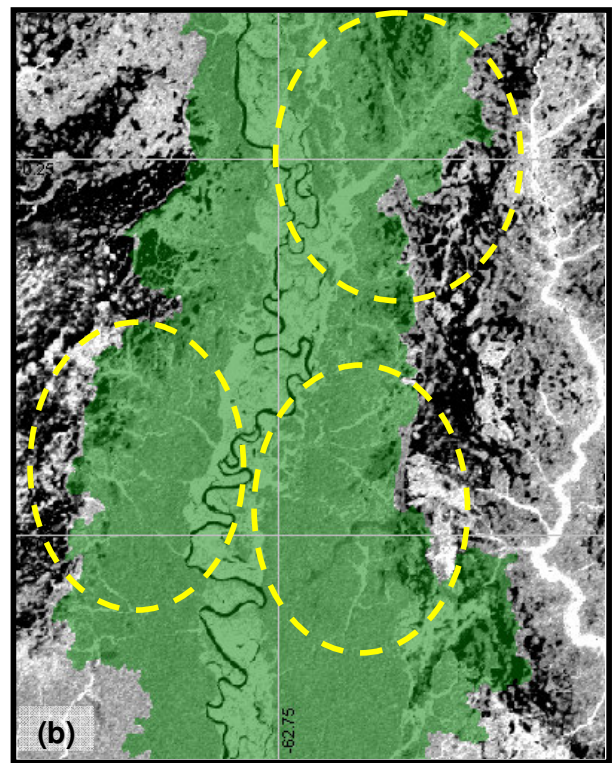
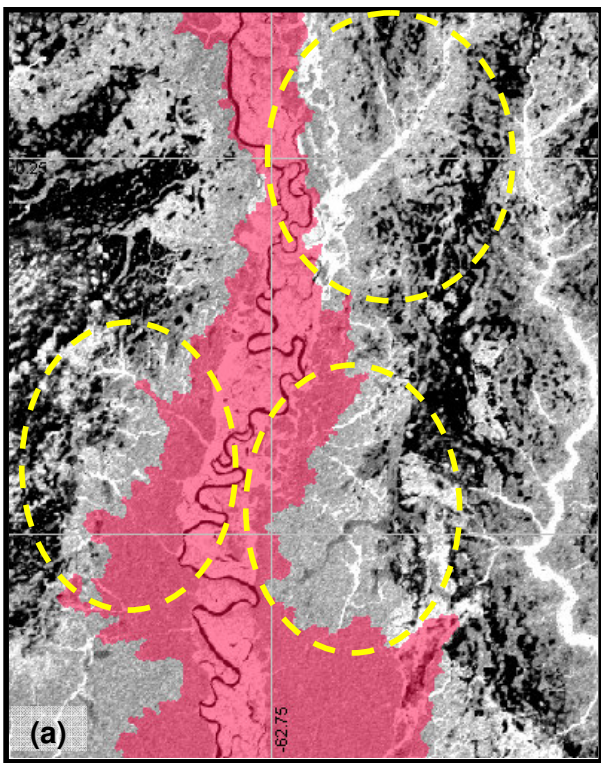


Figura 12 – Detalhes dos resultados das delimitações de bacias obtidas por: (a) e (c) MNT + método SB; e (b) e (d) MNT + novo método (equação linear). (a) e (b) estão plotadas sobre a imagem JERS-1 1995 e (c) e (d) sobre os pixels considerados como área de inundação, já excluídos aqueles sem conexão.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma nova abordagem baseada nos conceitos da conhecida abordagem “*stream burning*” para obter delimitações de grandes bacias hidrográficas em regiões planas e inundáveis com a utilização do conhecimento da distribuição espacial das áreas de inundação. Na aplicação do método, foram utilizados resultados da classificação de imagens do satélite multitemporal JERS-1 (Martinez e Le Toan, 2007) para delimitar as áreas de inundação. Ao analisar os resultados e compará-los a de outros métodos já existentes, observaram-se melhorias na delimitação de bacias com a modificação das elevações dos pixels no MNT original onde foram identificadas áreas de inundação na imagem classificada. Um novo MNT foi gerado e, onde no início havia superfícies planas (áreas de inundação) com direções de fluxo mal definidas, vales foram criados forçando o escoamento de água para o rio mais próximo.

Conforme foi descrito, a única restrição da aplicação do método é o conhecimento da distribuição espacial das áreas de inundação na região estudada. Essa informação pode ser extraída de imagens de satélite ou cartas digitais. O método também requer uma avaliação prévia das variáveis (coeficientes e equações) utilizadas. Por outro lado, o método indica fornecer resultados muito melhores em superfícies planas e inundadas que outros métodos existentes e, dessa maneira, de aplicação aconselhada a grandes bacias onde superfícies planas são comuns.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agência Nacional de Águas (2007) Base de dados hidrológicos, <http://hidroweb.ana.gov.br>.
- BORGEFORS, G. (1984) “*Distance transformation in arbitrary dimensions*”. Comp. Vision, Graphics Image Process., 27, 321-345
- BORGEFORS, G., 1986. “*Distance transformations in digital images*”. Computer Vision Graphics, and Image Processing, 34,344-371
- FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. (1991) “*Drainage networks from grid digital elevation models*”. Water Resources Research, 27(5), 709-717.
- GARBRECHT, J.; MARTZ, W. (1997) “*The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models*”. Journal of Hydrology, 193, 204-213.
- HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; et al. (2003) “*Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin*”. Remote Sensing of Environment, 87, 404-428.

- HESS, L. L.; MELACK, J.; FILOSO, S. (1995) “*Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar*”. IEEE Transactions On Geosciences and Remote Sensing, 33(4), 896-903.
- HUTCHINSON, M. F. (1989) “*A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*”. Journal of Hydrology, 106, 211-232.
- HYBAM - Hydrologie du Bassin Amazonien (2007) Base de dados, <http://mafalda.teledetection.fr/hybam/whybam2/index.php>
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. (1988) “*Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*”. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, 1593-1600.
- JONES, K. H. (1998) “*A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of DEM*”. Computers and Geosciences, 24(4), 315-323.
- JONES, R. (2002) “*Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples*”. Computers and Geosciences, 28, 1051-1060.
- JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. (1989) “*The flood pulse concept in river- floodplain systems*”. In: Proceedings of the International Large River Symposium, vol. 106, edited by D. P. Dodge, pp. 110-127.
- MARTINEZ, J.- M., T. LE TOAN (2007) “*Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data*”. Remote Sensing of Environment, 108(3) 209-223
- MARTINEZ, J.- M., SEYLER, F., GUYOT, J.L., et al. “*Water storage in Amazonian floodplains as a critical component in the control of the regional water cycle*”. Geophysical Research Letters. Em revisão.
- MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. (1995) “*Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method – comment*”. Journal of Hydrology, 167, 393-396.
- MAYORGA, E. LOGSDON, M. G.; BALLESTER, M. V. R.; et al. (2005) “*Estimating cell-to-cell land surface drainage paths from digital channel networks, with an application to the Amazon basin*”. Journal of Hydrology, 315, 167-182.
- MONTANARI, U. (1968) “*A method for obtaining skeletons using a quasi-Euclidean distance*”. J. Assoc. Comput. Mach., 15, 600-624

- MULLER, F.; COCHONNEAU, G.; GUYOT, J.-L.; et al. (2000) “*Watershed extraction using together DEM and drainage network: Application to the whole Amazonian basin*”. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4), Alberta, Canada.
- MULLER, F.; SEYLER, F.; COCHONNEAU, G. ; et al. (1999) “*Utilisation d’imagerie radar (ROS) JERS-1 pour l’obtention de réseaux de drainage. Exemple du Rio Negro (Amazonie)*”. International Symposium on hydrological and geochemical processes in large scale river basins, Manaus 99, Brazil.
- O’CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. (1984) “*The extraction of drainage networks from digital elevation data*”. Computer Vision, graphics and Image Processing, 28, 323-344.
- OGNIEWICZ, R.L.; KÜBLER, O. (1995) “*Hierarchic Voronoi Skeletons*”. Pattern Recognition, 28(3), 343-359
- PAGLIERONI, D.W., (1992) “*Distance transforms: Properties and machine vision applications*”. Graphical Models and image Processing, 54, 56-74
- PALACIOS-VÉLEZ, O. L.; CUEVAS-RENAUD. B. (1986) “*Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data*”. Journal of Hydrology 86, 299-314.
- PLANCHON, O.; DARBOUX, F. (2001) “*A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models*”. CATENA 46 (2-3), 159-176
- ROSENFELD, A.; KAK, A.C. (1982) “*Digital Picture Processing*”. 2nd ed., vol.2. Academic Press, New York.
- ROSENFELD, A.; PFALTZ, J. (1966) “*Sequential operations in digital picture processing*”. J. Assoc. Comput. Mach., 13, 471-494
- SAATCHI, S. S.; NELSON, B.; PODEST, E.; et al. (2000) “*Mapping Land-cover types in the Amazon Basin using 1 km J-ERS-1 mosaic*”. International Journal Of Remote Sensing, 21(6-7), 1201-1234.
- SAUNDERS, W. (1999) “*Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis*”. ESRI User Conference, July 24-30, 1999, San Diego, California
- SEIBERT, J.,; MCGLYNN, B. L. (2007) “*A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models*”. Water Resources Research, 43, W04501, DOI:10.1029/2006WR005128.
- SEYLER, F.; MULLER, F.; COCHONNEAU, G.; GUYOT, J.L. (1999) “*Délimitation de bassins versants à partir d’un modèle numérique de terrain. Comparaison de différentes méthodes*

pour le bassin du Rio Negro (Amazonie)". International Symposium on hydrological and geochemical processes in large scale river basins, Manaus 99, Brazil.

TARBOTON, D. G. (1997) "A new method for the determination of flow directions and upslope in grid digital elevation models". *Water Resources Research*, 33(2), 309-319

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, 263-293.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.-P.; ROUSSEAU, A. N.; et al. (2001) "Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and digital river and lake network". *Journal of Hydrology*, 240, 225-242.

WANG, X.; YIN, Z.-Y. (1998) "A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales". *Journal of Hydrology*, 210, 221-241

ZHU, Q.; TIAN, Y.; ZHAO, J. (2006) "An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis". *Computers and Geosciences*, 32, 615-263

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pelo suporte financeiro no Brasil e à CAPES (CAPES-COFECUB Projeto 516/05), ao IRD e ao CNRS pelo suporte financeiro na França. Este trabalho está inserido no programa ANR (TCCYFLAM) e se beneficia de dados adquiridos no quadro do Observatoire de Recherche en Environnement Hybam (INSU).