

# MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO E EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM: DADOS, MÉTODOS E PRECISÃO PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS

*DEM and drainage extraction automatic: data, methodologies and precision to hydrologic and geomorphologic researches*

**Jonas Otaviano Praça de Souza<sup>1</sup>**  
**Joana D'arc Matias de Almeida<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco**  
**Pós-Graduação de Geografia - Bolsista de doutorado FACEPE**  
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901  
jonasgeoufpe@yahoo.com.br

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco**  
**Departamento de Ciências Geográficas - Bacharelada em Geografia**  
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901  
joanamatiias@gmail.com

## RESUMO

As primeiras utilizações de Modelos Digitais de Elevação (MDE) nas análises geomorfológicas e hidrológicas datam da década de 1960, já as primeiras extrações automáticas de informação datam da década de 1970, enquanto que os trabalhos focados na extração da drenagem e na delimitação de bacias foram iniciados a partir da década de 1980. Apesar de algumas diferenças de rotina/algoritmos a maioria das metodologias segue os passos de preenchimento de depressão, identificação da direção do fluxo, identificação do fluxo acumulado e definição do limiar de iniciação de canais. Visando testar as diferenças entre os dados de imagens de satélites ASTER GDEM, SRTM e TOPODATA, o presente trabalho comparou as drenagens extraídas para a área da bacia do Riacho do Saco, em Serra Talhada – PE, relacionando-as com a drenagem de referência a partir de informações morfométricas. Foi escolhido o limiar de 0,243Km , analisando as informações topográficas entre os três MDEs, a principal variação deu-se pela baixa amplitude da declividade do SRTM, resultado do tamanho maior do pixel. Em relação à drenagem apesar do SRTM apresentar números totais mais próximos da drenagem de referência o ASTER GDEM apresenta 50% de sobreposição com a drenagem real, enquanto que o SRTM apresenta apenas 11%. Assim, o ASTER GDEM mostrou-se mais adequado para a extração automática da drenagem, sendo que grande parte das diferenças morfométricas apresentadas podem ser corrigidas a partir da inclusão dos lagos existentes e da exclusão da drenagem presentes na área dos lagos.

**Palavras chave:** Extração de drenagem. MDE. ASTER GDEM. SRTM. Morfometria.

## ABSTRACT

The first efforts to use DEM in geomorphological and hydrological analyzes were realized in the 1960's, but the automatic extractions were only developed in the 1970's. Following, the routines to automatic drainage extraction were defined in the 1980's, creating the basis to actual routines. The actual routines, that might have different algorithms, consist of to fill the depressions, to identify the flow direction, to identify the flow accumulation, and to define the flow accumulation threshold to channel beginning. The present research examined the divergences morphometric between the real drainage and the extract drainages to Riacho do Saco basin, in Serra Talhada – PE, from ASTER GDEM, SRTM and TOPODATA. The accumulation threshold was 0.243 Km . Firstly, the SRTM MDE shows a inferior slope angles because of the bigger pixel size. The SRTM morphometric drainage results are more similar to the reference drainage. Nevertheless the ASTER GDEM drainage shows a better matching with the reference drainage (50%), while the SRTM drainage matches only 11%. Consequently, the ASTER GDEM drainage is more adequate to automatic

drainage extraction. And the morphometric discrepancies can be minimized by the lakes introduction and by removing of the conflicting drainage.

**Keywords:** Drainage extraction. DEM. ASTER GDEM. SRTM. Morphometric.

## 1 INTRODUÇÃO

Os primeiros trabalhos que utilizaram Modelos Digitais de Elevação (MDE) como fonte de dados, no lugar das tradicionais curvas de nível, datam da década de 1960, onde as curvas de nível e pontos cotados dos mapas topográficos tradicionais eram digitalizados e interpolados em programas rudimentares para assim formar as matrizes com as elevações, informação X/Y/Z (longitude/latitude/elevação) dos MDEs (PEUCKER; DOUGLAS, 1975; MARK, 1984). Contudo, nesse primeiro momento as informações geomorfológicas/hidrológicas eram extraídas manualmente usando os mesmos métodos utilizados com as cartas topográficas o que tornava o processo lento, dispendioso e muitas vezes imprecisos; pois tanto o trabalho da digitalização das informações quanto o processo de extração eram manuais, além do fator custo/tempo a precisão estava diretamente ligada a capacidade de análise do pesquisador que faria a extração das informações (MARK, 1984; LINDSAY; EVANS, 2008; MORRIS; HEERDEGEN, 1988). Com o avanço tecnológico foi possível um maior número de opções de dados para aquisição, bem como o seu processamento, armazenamento e aplicação (DRUZINA; SOUZA, 2010), fornecendo subsídios para a substituição das técnicas manuais por técnicas automáticas (MEDEIROS; FERREIRA; FERREIRA, 2009).

Os primeiros esforços para extração automática de elementos/características geomorfológicas datam de meados da década de 1970, onde a partir da criação da matriz de dados se formulava algoritmos para a identificação automática de elementos da paisagem e dados morfométricos (JOHNSTON; ROSENFELD, 1975; PEUCKER; DOUGLAS, 1975; TORIWAKI; FUKUMURA, 1978; ENGELEN; HUYBRECHTS, 1981). Johnston e Rosenfeld (1975) apresentaram a extração automática de alguns elementos como picos, depressões, cristas e ravinas, já Peucker e Douglas (1975) além dessas informações, dão destaques caminhos de passagem de água, e a declividade, tanto angulação de forma geral quanto quebra de declividade, assim foi possível aos autores a delimitação, ainda que rudimentar, das curvas de nível e da drenagem. Toriwaki e Fukurama (1978) buscaram aperfeiçoar os métodos e algoritmos existentes de extração automática, identificando não apenas picos, ravinas, cristas e passagem de água como também as áreas de encosta, assim definido de forma automática não mais apenas elementos pontuais (picos e depressões) e lineares (ravinas, passagens e cristas), mas também elementos zonais, como área de encosta e regiões planas. Ainda dentro da extração de elementos zonais e com foco claramente geomorfológico Engelen e Huybrechts (1981) criam um algoritmo para a classificação da declividade em áreas homogêneas, se aproximando da precisão das extrações manuais, contudo de forma célere.

Posteriormente a preocupação voltou-se a delimitação de bacia hidrográfica (MARKS; DOZIER; FREW, 1984; BAND; 1986; MARTZ; JONG, 1988) e a extração da drenagem (MARK, 1984; O'CALLAGHAN; MARK, 1984), o que levou a um aperfeiçoamento dos métodos aplicados. Em relação a extração da drenagem o método topográfico (PEUCKER; DOUGLAS, 1975; MONTGOMERY; DIETRICH, 1989), baseado na curvatura topográfica, foi sendo preterido em relação aos métodos de cunho hidrológico (STROBL; FORTE, 2007), baseados na acumulação de fluxos que ao chegar em um determinado limiar deixaria de ser processo de encosta e se tornaria processo fluvial determinando, assim, o início do canal (MARK, 1984; DIETRICH et al., 1992). O'Callaghan e Mark (1984) consolidaram um método hidrológico para extração, o qual é utilizado até hoje, com algumas alterações nos algoritmos, tendo como base a sequência de passos: preenchimento de depressões, definição da direção de fluxo, calculo de acumulo de fluxo, e

extração da drenagem.

O presente trabalho visa abordar esses métodos e algumas de suas modificações/alternativas, no método de preenchimento das depressões, na definição da direção do fluxo e especialmente na determinação do limiar de acumulação para a extração da drenagem, apontado por Mark (1984) como principal ponto a ser desenvolvido/aprimorado. Por fim, serão aplicados e comparados métodos expeditos de análise, como o preenchimento de depressões, direção de fluxo e delimitação de canais, cujas aplicações sejam compatíveis com os algoritmos utilizados pelos *softwares* atualmente mais utilizados.

## 2 TIPOS DE DADOS, ERROS E IMPRECISÕES EM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Os MDEs foram gerados, inicialmente, a partir de interpolação, usando diferentes métodos de dados retirados de cartas topográficas (COLE; MACINNES; MILLER, 1990), em especial das curvas de nível e pontos cotados; posteriormente as informações começaram a serem obtidas, também, a partir de ortofotocartas e imagens de satélite tendo o *United States Geological Survey* (USGS) como um dos responsáveis pela popularização dos MDEs (ALVES SOBRINHO et al. 2010), a partir da disponibilização do território dos EUA, inicialmente na escala de 1:250.000 em 1978 e posteriormente em 1982 na escala de 1:24.000 e com resolução espacial de 30 metros (O'CALLAGHAN; MARK, 1984). Mais recentemente houve o surgimento de bases de dados públicas em mesoescalas cobrindo grande parte do globo, tais como os dados SRTM e ASTER GDEM; ao mesmo tempo dados de alta precisão, gerados por GPS (Sistema de Posicionamento Global) diferencial e LIDAR (*Light Detection and Ranging*), surgem focando trabalhos mais detalhados com precisão vertical abaixo de 1 metro e resolução espacial de alguns metros, ou até melhores, contudo com um maior custo (CASAS et al., 2006; RAYBURG; THOMS; NEAVE, 2009; POGGIO; SOILLE, 2011).

Os MDEs podem apresentar diversos tipos de erros e incertezas, os quais se refletem nos dados geomorfológicos e hidrológicos obtidos a partir deles. Estas falhas se dividem em erros de MDE (sistemáticos, picos/depressões e randômicos), de interpolação, de escala e tamanho do pixel (LINDSAY; EVANS, 2008; DIXON; EARLS, 2009; VOGT; COLOMBO; BERTOLO, 2003). Como também erros nas informações extraídas, resultado dos algoritmos utilizados, cada algoritmo irá apresentar imprecisões específicas (POGGIO; SOILLE, 2011), contudo com a maioria dos *softwares* disponíveis há apenas um tipo de algoritmo para cada tipo de processamento, limitando as possibilidades dos usuários (WECHSLER, 2007), como observado através da utilização dos softwares ArcGis e SWAT (Soil and Water Assessment Tools).

Quanto aos MDEs obtidos a partir de mapas topográficos, a precisão vertical e a resolução espacial estarão diretamente ligadas a escala do mapa inicial (MORRIS; HEERDEGEN, 1988), o que no Brasil há o problema de não haver cobertura ampla do território com mapeamentos detalhados, sendo que mapeamentos na escala 1:25.000 e maiores, normalmente se limitam a região litorânea ou a grandes centros. Já os MDEs gerados a partir de dados GPS e LIDAR tem sua precisão/resolução ligadas ao trabalho de campo e as especificidades de cada equipamento utilizado (CASAS et al., 2006; RAYBURG; THOMS; NEAVE, 2009; POGGIO; SOILLE, 2011; SOFIA et al., 2011).

Os dados SRTM apresentam diferentes precisões verticais, o que é alterado por diferentes tipos de erros, dessa forma a precisão vertical deve ser testada para cada área (não apenas para o SRTM, mas para todos os tipos de MDE), contudo a principal preocupação dá-se pela resolução espacial de *pixel* de 90 metros, o mesmo espaçamento de *pixels* utilizado pelo USGS (ANDRADES FILHO; ZANI; GRADELHA, 2009), o qual impede a identificação de elementos/formas menores da paisagem, como por exemplo, a curvatura das encostas, dificultando o uso para trabalhos hidrológicos, sendo necessário pelo menos um *pixel* de 20 metros (HANCOCK et al., 2006), por

exemplo, sendo aconselhado o uso para trabalhos de ênfase regional (BHANG; SCHWARTZ, 2008; DEMIRKESEN, 2008; SEYLER et al., 2009). Já os dados ASTER GDEM tem apresentado, em geral, altos índices de erros verticais, 20 metros em alguns casos (TOMAZONI et al., 2011), contudo por ter uma melhor resolução espacial se enquadraria a trabalhos mais detalhados, inclusive hidrológicos (POGGIO; SOILLE, 2011), contudo novamente é necessário que haja a análise da precisão vertical do MDE de forma a avaliar se ele se enquadra na escala desejada.

### 3 MÉTODOS DE PREENCHIMENTO DE DEPRESSÕES

Os MDEs podem apresentar depressões, ou seja, pontos mais baixos que todos os pontos ao redor, funcionam como sumidouros, o que atrapalha as análises relativas à extração da drenagem em especial a identificação da direção do fluxo (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), sendo o número das depressões inversamente proporcionais a resolução do MDE (GRIMALDI et al., 2007) e do fluxo acumulado, que pode ser interrompido na direção do escoamento real do terreno e as linhas de drenagem serem desviadas para sub-bacias (ZEILHOFER, 2001). Contudo, em sua maioria, essas depressões, como áreas de múltiplos canais, dunas ou depósitos de sedimentos (OLIVEIRA et al., 2007), representam erros no MDE, não representando a realidade da superfície trabalhada, desse modo surge a necessidade da remoção (POGGIO; SOILLE, 2011; JENSON; DOMINGUE, 1988; WECHSLER, 2007). Ao mesmo tempo a remoção de depressões reais no relevo como lagos, planícies de inundação e marmitas de dissolução pode gerar erros na extração da drenagem (MOHARANA; KAR, 2002) especialmente com o surgimento de MDE de alta resolução os quais conseguem representar pequenas depressões reais (ARNOLD, 2010).

A técnica básica para a remoção das depressões utiliza inicialmente matrizes de 3x3 onde a altitude da depressão, que está na célula central, é elevada até a menor altitude de uma das células vizinhas (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), caso após esse procedimento continue existindo uma depressão é utilizada matrizes maiores até que esta seja removida (JENSON; DOMINGUE, 1988), contudo essa técnica pode gerar grandes áreas planas dificultando a identificação da direção do fluxo (GRIMALDI et al., 2007). Esse é o método mais utilizado pelos *softwares* disponíveis atualmente, como por exemplo, o ESRI *Arcgis*, através do *fillsinks*, considerando as altitudes dos *pixels* vizinhos, preenchendo os erros e gerando assim dados mais consistentes (OLIVEIRA et al., 2010).

Além do método de incrementar a altitude das depressões, outros métodos foram desenvolvidos como o método de diminuição dos valores em um determinado caminho, o qual procura o ponto posterior à depressão que iria continuar o fluxo, diminuindo o valor deste ponto de modo a gerar um caminho hidrológico; como também métodos híbridos com elementos desses dois métodos (POGGIO; SOILLE, 2011; WECHSLER, 2007; ARNOLD, 2010; POGGIO; SOILLE, 2012), métodos que modificam a altitude da depressão a fim de manter a declividade presente até o ponto, ou seja, a depressão é elevada a uma altitude entre a altitude da célula de chegada e a altitude da célula de saída (GRIMALDI et al., 2007). Já outros métodos tentam diferenciar das depressões frutos de erros no MDE e das depressões reais, removendo apenas os erros e mantendo as depressões reais (ARNOLD, 2010; MOHARANA; KAR, 2002).

### 4 DEFINIÇÃO DA DIREÇÃO DO FLUXO

O método básico para a determinação da direção do fluxo, também utiliza matrizes 3x3, aonde cada célula tem oito vizinhos e o fluxo vai da célula central em direção a célula com menor valor de altitude, em caso de duas células vizinhas com a mesma altitude o algoritmo dá preferência às células que não estejam na diagonal gerando, assim, um fluxo de direção única (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), no caso de mais de duas células adjacentes terem a mesma altitude, a direção será para a célula central (JENSON; DOMINGUE, 1988), esse é o método

utilizado em *softwares* mais conhecidos como o *Arcgis*, através do *flow direction* definindo a trajetória do fluxo, de água e sedimentos, em áreas adjacentes em pontos de menor altitude da bacia hidrográfica (OLIVEIRA et al., 2012).

Contudo há uma série de estudos e adaptações para este método, que podem ser divididos em métodos de direção única e ou de direção múltipla (TARBOTON, 1997; METZ; MITASOVA; HARMON, 2011; POGGIO; SOILLE, 2012), contudo os métodos de direção múltipla não definem a drenagem especificamente, assim, não são adequados para estudos que a definição do canal é necessária (POGGIO; SOILLE, 2011; PILOTTI; GANDOLFI; BISCHETTI, 1996).

## 5 DEFINIÇÃO DO INÍCIO DOS CANAIS

A definição do início dos canais, ou seja, sobre o limiar de acumulação de fluxo que irá formar um canal, é o ponto que apresenta maior questionamento da metodologia hidrológica de extração de drenagem (MARK, 1984), muitas vezes sendo escolhidos valores arbitrários (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; WALCOTT; SUMMERFIELD, 2008), ou buscando um valor adequado para cada localidade levando em consideração as características ambientais (POGGIO; SOILLE, 2011; DIETRICH et al., 1992; PILOTTI; GANDOLFI; BISCHETTI, 1996; VOGT; COLOMBO; BERTOLO, 2003; STROBL; FORTE, 2007); relação área de acumulação e declividade (GIONNONI; ROTH; RUDARI, 2005); como também o método de tentativa e erro, onde são utilizados diferentes limiares e as drenagens extraídas são comparadas com uma base fidedigna, buscando um limiar adequado (JENSON; DOMINGUE, 1988; YIN; WANG, 1999; GARCIA; CAMARASA, 1999; OZDEMIR; BIRD, 2009), ou então variações do método tentativa erro, onde a comparação com a base confiável é feita a partir de índices de similaridade, e não a partir de comparação visual (LIN et al., 2006).

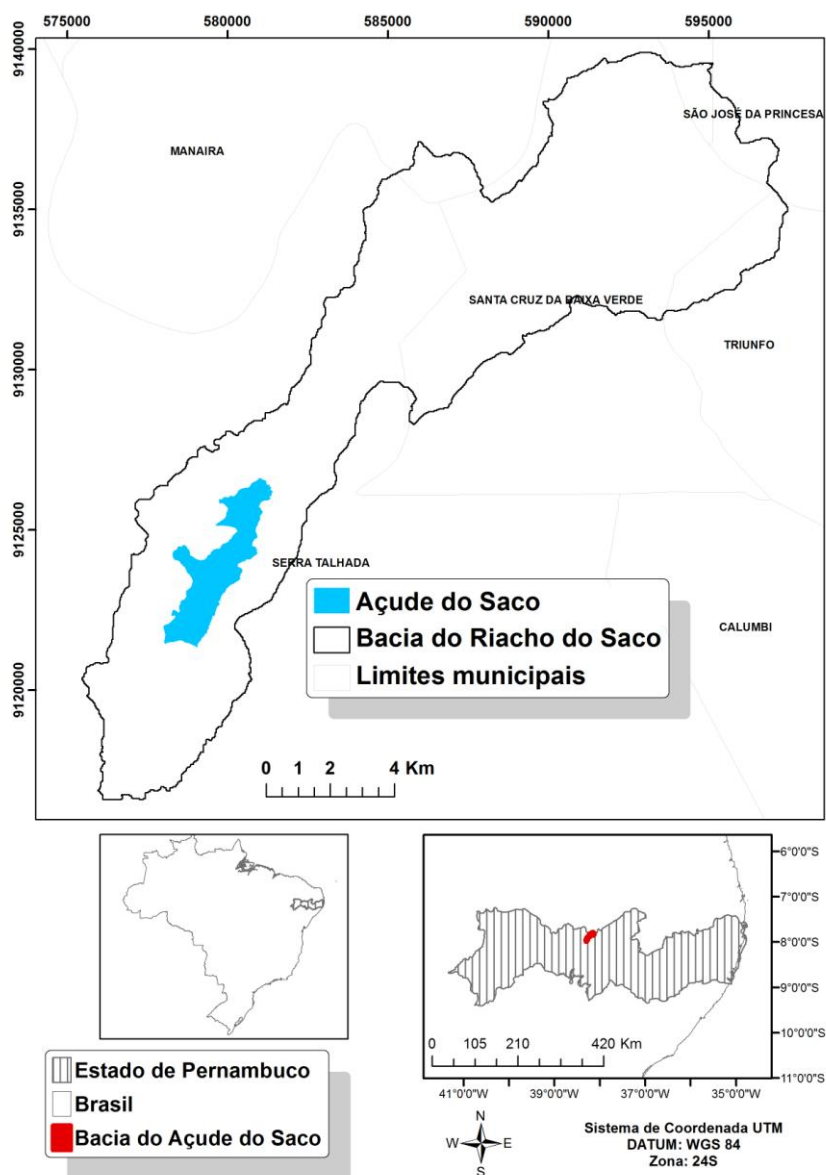
Contudo deve-se observar que dependendo do *software* usado o limiar pode ser escolhido por um determinado valor limite de número de células, e não pelo valor da área limite de forma direta, nesses casos o tamanho do pixel irá alterar o valor da área limite (YANG et al., 2011; LIU; ZHANG, 2011).

## 6 DADOS E MÉTODOS APLICADOS

Foram utilizados três diferentes fontes para a construção dos MDEs; dados SRTM obtido a partir do programa Brasil em Relevo da EMBRAPA; dados TOPODATA obtidos a partir do programa TOPODATA desenvolvido pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (VALERIANO; ROSSETTI, 2011); e dados ASTER GDEM obtidos a partir do programa de disponibilização gratuita desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Já a drenagem real/referência foi obtida a partir da interpretação de imagens QUICKBIRD (quatro imagens entre julho de 2009 e janeiro de 2012), informações retificadas a partir de dados de campo obtidos a partir do GPS topográfico Trimble PRO-XH. A análise foi realizada para uma bacia hidrográfica no sertão nordestino, entre os municípios de Serra Talhada, Triunfo e Santa Cruz da Baixa Verde em Pernambuco e os municípios São José da Princesa e Manaíra, na Paraíba; apresentando visível variação paisagística e topográfica, como, por exemplo, áreas pedimentares com baixa declividade, e áreas de escarpa de falha com alta declividade (figura 01).

Os mesmos procedimentos foram realizados para as três fontes de dados, inicialmente foram preenchidas as depressões e retirado os picos utilizando a ferramenta *fill sinks*; o segundo passo foi definir a direção do fluxo utilizando a ferramenta *flow direction*; e posteriormente definir o fluxo acumulado a partir da ferramenta *flow accumulation*; as três ferramentas estão presentes no módulo *Hydrology* da extensão *Spatial Analyst Tools* do ArcGis 9.3, como também na extensão de domínio gratuito, o *Arc-Hydro*, desenvolvido pelo Centro de Pesquisa em Recursos Hídricos da

Universidade do Texas. Este *software* é mantido e distribuído gratuitamente pelo ESRI (FAN; COLLISCHONN, 2009). Os passos para a extração da drenagem estão disponíveis no *Terrain Processing* e a metodologia é semelhante à aplicada com o *Hidrology*.



**Figura 1:** Mapa de localização da bacia do Riacho do Saco.

Para a extração da drenagem considerou-se a acumulação de fluxo, ou seja, a partir de limiar de fluxo acumulado (a técnica mais utilizada), volume de água captada, onde seria iniciado um canal, o limiar foi escolhido a partir do método de tentativa-erro, comparando o resultado das drenagens extraídas com a drenagem de referência. Para tal foi utilizada a ferramenta *con*, também na extensão *Spatial Analyst Tools*, para a definição dos limiares; lembrando que apesar da ferramenta identificar o limiar a partir do número de células escolhido deve-se utilizar um limiar respeitando o tamanho da célula de cada MDE, assim escolhendo a partir da área real (km ou m) e a partir disto definir o número exato de células para cada MDE. Posteriormente foi utilizada a ferramenta *stream to feature* para a definição vetorial dos canais, assim foi realizada uma comparação visual entre as drenagens extraídas e a drenagem de referência, sendo definido o limiar mais adequado (foram utilizados os mesmos limiares para os três MDEs). A partir do *raster* de drenagem escolhido utilizou-se as ferramentas *Stream link* e *Watershed*, novamente do módulo

*Hydrology*. Posteriormente o *raster* das sub-bacias foi convertido em polígonos e as diversas sub-bacias foram anexadas formando a bacia desejada.

Depois de extrair a drenagem e a delimitação da bacia para os três MDEs utilizando o método citado, os resultados foram comparados à drenagem de referência, utilizando alguns parâmetros morfométricos indicados para este tipo de análise (MORRIS; HEERDEGEN, 1988; PILOTTI; GANDOLFI; BISCHETTI, 1996; YIN; WANG, 1999; GIONNONI; ROTH; RUDARI, 2005; HANCOCK et al., 2006; LIN et al., 2006; LINDSAY; EVANS, 2008; POGGIO; SOILLE, 2012; TOMAZONI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010): declividade (mínima, máxima e média), área da bacia; curvatura horizontal e curvatura vertical (mínima, máxima e média), orientação de encosta; estes índices foram utilizados para avaliar a diferenciação topográfica entre os MDEs; número de rios, extensão total dos rios, extensão do curso principal, ordem de rio, bifurcação e densidade de drenagem, estes parâmetros irão estar relacionado com a similaridade da extração a partir dos MDEs com a drenagem de referência.

## 7 RESULTADOS

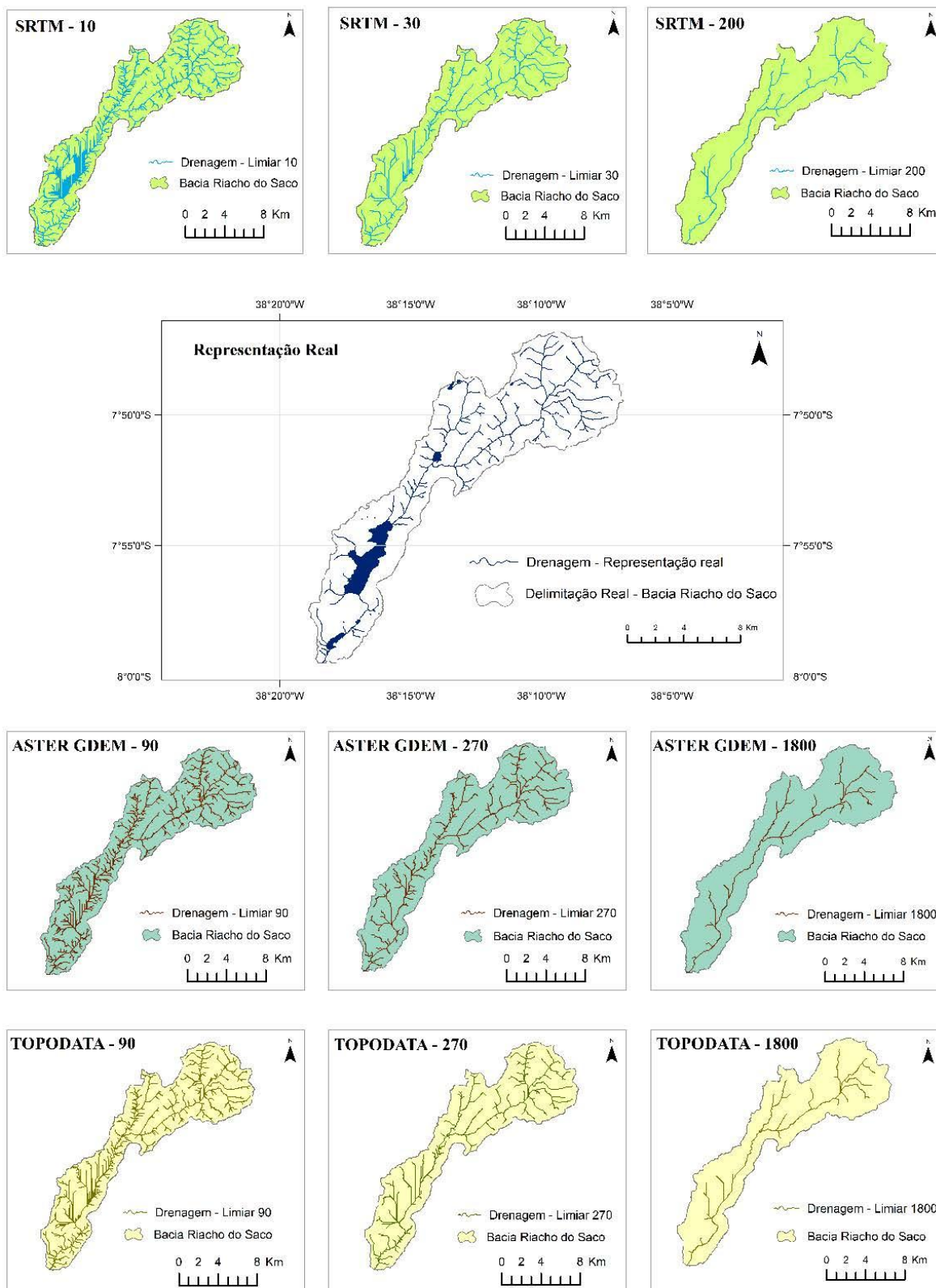
Inicialmente foram realizados os procedimentos básicos para os três MDEs visando o cálculo do fluxo acumulado para cada um deles, como também foi realizado a delimitação da drenagem de referência incluindo os corpos d'água presentes na bacia. Utilizando o método de tentativa e erro, foram testados diferentes limiares de acumulação para extração de drenagem para cada MDEs, comparando as drenagens obtidas (Figura 2) com a drenagem de referência.

Os limiares foram definidos a partir da área em m, lembrando que o módulo *Spatial Analyst Tools* e a ferramenta "con" utilizam o número de *pixels* como limiar, desta forma é necessário calcular o tamanho em km de cada *pixel* para a escolha dos limiares iguais para MDEs com *pixels* de tamanho diferentes como é o caso do ASTER GDEM/TOPODATA (30m x 30m) e o SRTM (90 m x 90m). Para demonstrar os diferentes resultados foram representadas drenagens extraídas para cada MDE a partir de três diferentes limiares (figura 2).

Um limiar subdimensionado de 0,081 Km, que representa 10 *pixels* para o SRTM e 90 *pixels* para o ASTER GDEM e o TOPODATA; o limiar mais adequado em relação à drenagem de referência com 0,243 Km, que representa 30 *pixels* para o SRTM e 270 *pixels* para o ASTER GDEM e o TOPODATA; e um limiar superdimensionado de 1,62 Km, que representa 200 *pixels* para o SRTM e 1800 *pixels* para o ASTER GDEM e o TOPODATA. Enquanto que utilizando as ferramentas básicas do *ArcGis* é necessário escolher por quantidade de *pixel*, no *Archydro* é possível escolher a área desejada diretamente.

O limiar de 0,081Km não é suficiente para a formação de novos canais de drenagem, desse modo o que se verifica ao se comparar as drenagens extraídas com a drenagem de referência é a presença de inúmeros canais inexistentes, resultado do baixo limiar de formação. Por outro lado o limiar de 1,62Km comparado com a drenagem de referência apresentou iniciação de canais tardia, ou até a inexistência de canais de baixa ordem. Já o limiar de 0,243Km apresentou maior similaridade com a drenagem de referência. Vale lembrar que esse limiar é específico para essa bacia, refletindo o arranjo ambiental da mesma, ou seja, para cada área ou arranjo de características ambientais é necessário realizar separadamente essa análise; a escala de análise desejada também influência o limiar escolhido.

## DRENAGENS A PARTIR DE MDE SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA



**Figura 2:** Comparação entre a drenagem extraída para cada MDE utilizando diferentes limiares de acumulação e a representação da drenagem real.



Os resultados obtidos da comparação dos MDE's gerados a partir de imagens ASTER, TOPODATA e SRTM (tabela 1) permitiram verificar, em relação aos parâmetros topográficos, primeiramente a relação entre a Altura Máxima, obtendo-se através da média entre os MDE's 1.123m, enquanto que a variação para cada tipo de dados foi de 0,18% para SRTM/TOPODATA, já que o TOPODATA provém do SRTM, e -0,36% de variação em ASTER GDEM. A Altura Média entre os MDE's foi de 732,32 m e a variação SRTM, TOPODATA e ASTER GDEM foi de 0,42%, 0,20% e -0,62%, respectivamente. E média da Altura Mínima entre os três tipos de dados foi de 415,67 m, e novamente a variação TOPODATA/SRTM, de -0,16%, diferente do ASTER que apresentou variação de 0,32%. Os cálculos de Amplitude Altimétrica resultaram em 707,33 m de média entre os MDE's e variações de -0,75% ASTER e 0,38% tanto para TOPODATA quanto para SRTM. A média da Declividade Máxima foi de 45,5°, enquanto que a variação para ASTER foi de 7,29%, 4,66% TOPODATA e -11,95% SRTM. A Declividade Média apresentou valor de 8,58° e variações de 0,78%, 3,22% e -4,0% para os dados ASTER, TOPODATA e SRTM, respectivamente. O SRTM apresenta em geral menores valores para a declividade por ter o *pixel* maior que os outros MDEs, impossibilitando a representação de algumas formas menores.

A comparação dos parâmetros hidrográficos, da drenagem real e das extrações a partir dos dados utilizados neste trabalho calculou a área da bacia, perímetro da bacia, tamanho do rio principal, número de rios, tamanho total dos rios, tamanho médio dos rios, densidade de drenagem e a frequência dos rios (tabela 2).

**Tabela 1:** Comparação entre parâmetros topográficos.

	ALTURA MÁXIMA	ALTURA MÉDIA	ALTURA MÍNIMA	AMPLITUDE ALTIMÉTRICA	DECLIVIDADE MÁXIMA	DECLIVIDADE MÉDIA
MÉDIA ENTRE OS MDEs	1123m	732.32m	415.67m	707.33m	45.5°	8.58°
VARIAÇÃO ASTER GDEM	-0.36%	-0.62%	0.32%	-0.75%	7.29%	0.78%
VARIAÇÃO TOPODATA	0.18%	0.20%	-0.16%	0.38%	4.66%	3.22%
VARIAÇÃO SRTM	0.18%	0.42%	-0.16%	0.38%	-11.95%	-4.00%

**Tabela 2:** Comparação de parâmetros hidrográficos, drenagem real e extrações.

	ÁREA DA BACIA	PERÍMETRO DA BACIA	TAMANHO DO RIO PRINCIPAL	NÚMERO DE RIOS	TAMANHO TOTAL DOS RIOS	TAMANHO MÉDIO DOS RIOS	DENSIDADE DE DRENAGEM	FREQUÊNCIA DE RIOS
VALORES DE CONTROLE	142.88 km	110.26 km	35.01 Km	146	178.36 Km	1.22 km	1.25 Km /Km	1.02
VARIAÇÃO ASTER GDEM	0.38%	0.48%	30.29%	37.74%	16.58%	-15.36%	16.14%	37.21%
VARIAÇÃO TOPODATA	-0.73%	0.28%	30.85%	27.36%	12.88%	-11.37%	13.70%	28.29%
VARIAÇÃO SRTM	-1.05%	-1.85%	28.81%	28.30%	19.45%	-6.90%	20.71%	29.66%

Por enquanto que a área e o perímetro da bacia tiveram variações ínfimas, menos de 2%, para os três MDEs; os parâmetros relacionados diretamente com a drenagem apresentaram grande variação. O valor de controle no tamanho do rio principal foi de 35,01km, variando entre os dados com os valores de 30,29% ASTER, 30,85% TOPODATA e 28,81% SRTM. O número de rios foi representado por 146, com variação entre os MDE's de 37,74%, 27,36%, 28,30% corresponde a ASTER, TOPODATA e SRTM. 178,36 km foi o tamanho total dos rios em valor de controle, variando de 19,45% SRTM, 16,58% ASTER e 12,88% para o TOPODATA. O tamanho médio dos rios foi de 1,22 km, enquanto que em dados ASTER a variação foi de -15,36%, -11,37% em

TOPODATA e -6,50% em SRTM. A densidade da drenagem apresentou valor de 1,25 km /km, variando em 16,14% em MDE ASTER, 13,70 em MDE TOPODATA e 20,71 em MDE SRTM. E analisando os cálculos de frequência dos rios obtêm-se as variações de 37,21%, 28,29% e 29,66%, aos MDEs ASTER, TOPODATA e SRTM respectivamente.

As três drenagens extraídas apresentaram um valor maior de número de rios, como também de tamanho e das informações derivadas, por causa da extração de canais/trechos inexistentes em área planas e especialmente nas áreas dos açudes e lagos. Outro ponto, importante é a relação entre número de canais e extensão total dos canais, como por exemplo, para o TOPODATA que apesar de ter 27,36% a mais de número de rios, tem apenas 12,88% a mais na extensão total dos rios. Esta diferença é resultado da extração de inúmeros pequenos canais de primeira ordem inexistentes, o que gerou um tamanho médio de rios menor que a drenagem de referência.

A comparação da hierarquia fluvial a partir de Strahler (tabela 3) permitiu a obtenção dos seguintes valores: o MDE a partir de imagem ASTER gerou 146 rios de primeira ordem, enquanto que o MDE TOPODATA gerou 135 rios e o SRTM, 136. Os rios de segunda ordem apresentaram valores de 38, 35 e 29, nos dados gerados de MDEs ASTER, TOPODATA e SRTM respectivamente.

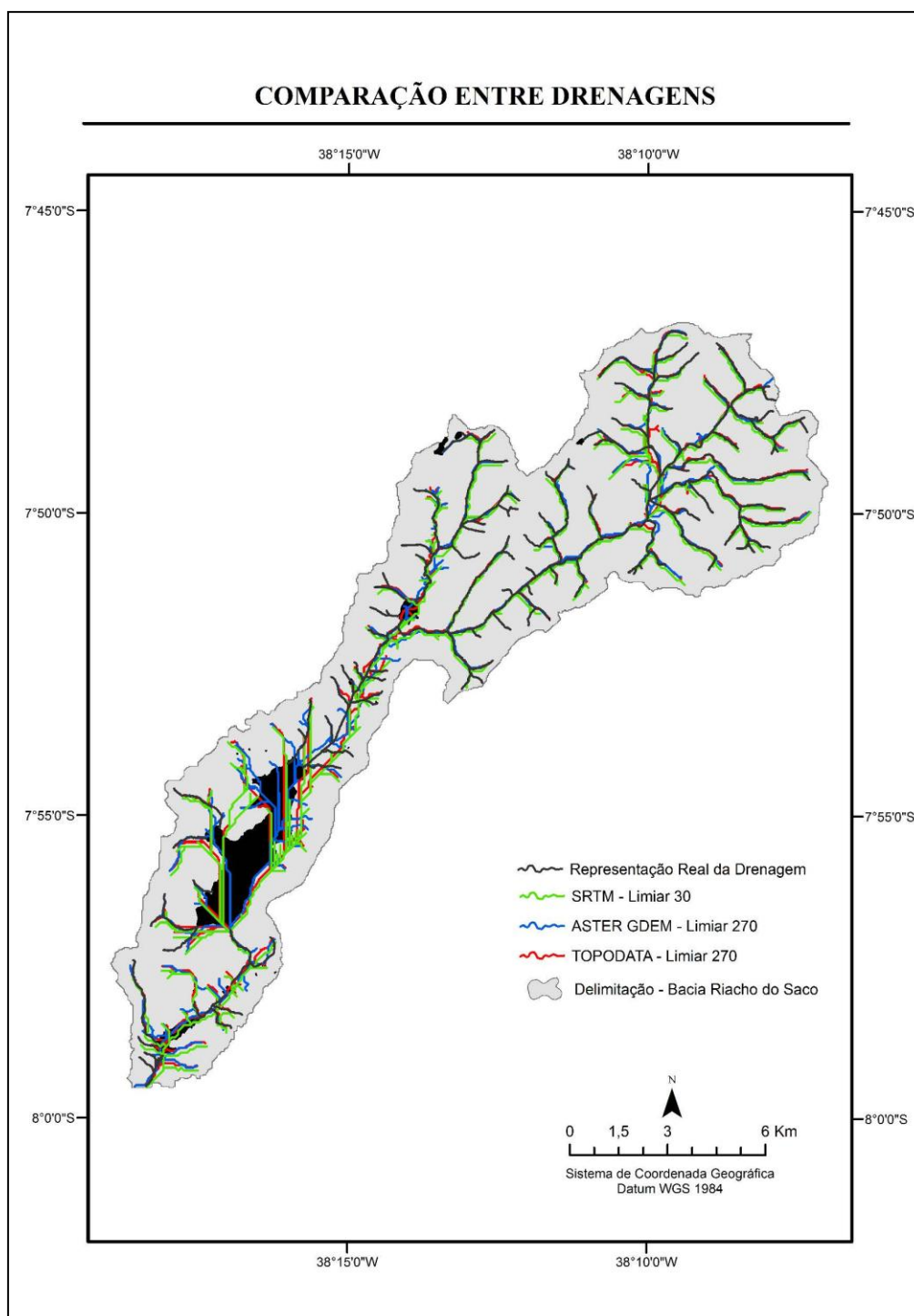
**Tabela 3:** Comparação da hierarquia fluvial (STRAHLER, 1952) e índices de bifurcação.

	NÚMERO DE RIOS POR ORDEM (STRAHLER)					BIFURCAÇÃO				RAZÃO DE BIFURCAÇÃO
	1	2	3	4	5	2	3	4	5	
VALORES DE CONTROLE	106	22	4	1	0	4.82	5.5	4	-	4.82
VARIAÇÃO ASTER GDEM	146	38	8	2	1	-20%	-14%	0%	-	-19%
VARIAÇÃO TOPODATA	135	35	7	2	1	-20%	-9%	-13%	-	-24%
VARIAÇÃO SRTM	136	29	6	2	1	-3%	-12%	-25%	-	-20%

De terceira ordem foram 8 rios a partir de ASTER, 7 a partir de TOPODATA e 6 em SRTM. Apresentaram 2 rios de quarta ordem os três MDE's. Por fim os três MDEs apresentaram um rio de 5 ordem. Enquanto que para os valores de controle têm-se 106 rios de primeira ordem, 22 de segunda ordem, 4 de terceira, 1 de quarta e 0 de quinta ordem. A definição de um rio de quinta ordem nas drenagens extraídas deu-se pelo fato da extração de inúmeros canais na extensa área plana onde está presente o Açude do Saco, no centro da bacia. Estes canais inexistentes formaram um canal de ordem 4 que ao se juntar ao riacho do Saco mudaria a ordem do mesmo para 5.

O índice de bifurcação foi de -20% para ASTER e TOPODATA em dois canais e de -3% para SRTM, três canais apresentaram índice de bifurcação de -14% ASTER, -9% TOPODATA e -12% SRTM, e em quatro canais os índices foram de 0% ASTER, -13% TOPODATA e -25% SRTM. Em valores de controle os índices foram de 4,82; 5,5 e 4, para dois, três e quatro canais. A razão de bifurcação foi de -19% ASTER, -24% TOPODATA e -20% SRTM, e em valores de controle foi de 4,82. Novamente as diferenças ocorreram, principalmente, pela extração de canais em áreas de lagos.

Por fim, as drenagens extraídas foram sobrepostas à drenagem de referência visando analisar as similitudes das drenagens (figura 03). É visível a diferença da sobreposição nas áreas planas e nas áreas com maior declividade. Enquanto que nas áreas planas, como nas áreas dos lagos na parte superior central da bacia, há grandes diferenças entre a localização da drenagem enquanto que nas áreas de maior declividade, como a parte intermediária entre a parte superior da bacia e a inferior, há uma maior semelhança entre as drenagens.



**Figura 3:** Sobreposição das drenagens extraídas e da representação da drenagem real.

A sobreposição entre a drenagem real e as drenagens extraídas dos MDE's foi calculada em Km e porcentagem (tabela 04). O tamanho da base de controle foi de 153km, enquanto que a interseção SRTM foi de 17km, a ASTER foi de 76km e a TOPODATA, 66km; resultado que representado em porcentagem representa 11%, 50% e 43%, respectivamente. Novamente é necessário ressaltar que uma parte dos erros deve-se a extração de drenagem nas áreas dos lagos e açudes. A baixa porcentagem de sobreposição da drenagem SRTM deve-se ao fato, novamente, ao tamanho do *pixel* que ao ser maior dificulta a exata delimitação dos elementos topográficos e hidrológicos.

**Tabela 4:** Sobreposição entre as drenagens.

	KILÔMETROS	PORCENTAGEM
TAMANHO DA BASE CONTROLE	153Km	100%
INTERSEÇÃO DO SRTM	17 Km	11%
INTERSEÇÃO DO TOPODATA	66 Km	43%
INTERSEÇÃO DO ASTER GDEM	76 Km	50%

## 8 CONCLUSÕES

Após avaliar os resultados das drenagens extraídas pelos três diferentes MDEs, notou-se que apesar da menor diferença dos parâmetros morfométricos apresentadas pela drenagem do SRTM, o ASTER GDEM mostrou-se mais adequado para a extração automática da drenagem por apresentar um maior índice de sobreposição em relação à drenagem de referência.

Ao mesmo tempo, notou-se que a maioria dos erros são resultados da extração incorreta de canais em locais planos, possivelmente criados durante o processo de preenchimento de depressões. Esses erros podem ser evitados utilizando diferentes métodos de preenchimento de depressões ou de identificação da direção de drenagem. Contudo esses métodos normalmente não estão disponíveis nos *softwares* mais comuns, como é o caso do ESRI e *ArcGis*. Porém, na ferramenta *Archydro* há possibilidade da inserção dos lagos e reservatórios, para corrigir a extração da drenagem nessas áreas. Como também, após a extração da drenagem realizar a inclusão dos lagos e exclusão das drenagens presentes na área dos lagos.

Contudo, é necessário avaliar a qualidade do dado local, já que a literatura mostra que há diferença entre a qualidade dos dados de uma mesma fonte em áreas diferentes, como por exemplo, dos dados ASTER GDEM; erros estes menos recorrentes nos dados SRTM e TOPODATA. Porém é necessária a correção das drenagens extraídas, especialmente em bacias com extensas áreas planas e para trabalhos mais detalhados.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Fundação de Amparo a Ciência de Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE, pela concessão de bolsas aos autores do artigo.

## REFERÊNCIAS

ALVES SOBRINHO, T. et al. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Eng. Agric.**, Jaboticabal, v. 30 n. 1, p. 46-57, 2010.

ANDRADES FILHO, C. O.; ZANI, H.; GRADELHA, F. S. Extração automática das redes de drenagem no Pantanal de Aquidauana: estudo comparativo com dados SRTM, ASTER e carta topográfica DSG. **Geografia (Rio Claro)**, Rio Claro, v. 34, n. esp., p. 731-743, 2009.

ARNOLD, N. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. **Progress in Physical Geography**, London, UK/Brent Yarnal, Penn State, USA, v. 34, no. 6, p. 781-809, 2010.

BAND, L. E. Topographic partition of watersheds with Digital Elevation Models. **Water Resour. Res.**, Washington, D.C., v. 22, p. 15-24, 1986.

BHANG, K. J.; SCHWARTZ, F. Limitations in hydrologic applications of C-Band SRTM DEM in low-relief settings. **IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.**, New York, v. 5, no. 3, p. 497-501, 2008.

CASAS, A. et al. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. **Earth Surf. Processes Landf.**, Sussex, v. 31, p. 444-456, 2006.

COLE, G.; MACINNES, S.; MILLER, J. Conversion of countoured topography to digital-terrain data. **Comput. Geosci.**, New York, v. 16, no. 1, p. 101-109, 1990.

DEMIRKESEN, A. C. Digital terrain analysis using Landsat-7 ETM+ imagery and SRTM DEM: a case study of Nevsehir province (Cappadocia), Turkey. **Int. J. Remote Sens.**, v. 29, no. 14, p. 4173-4188, 2008.

DIETRICH, W. E. et al. Erosion thresholds and land surface morphology. **Geology**, Boulder, v. 20, p. 675-679, 1992.

DIXON, B.; EARLS, J. Resample or not? Effects of resolution of DEMs in watershed modeling. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 23, p. 1714-1724, 2009.

DRUZINA, A. G. D. S.; SOUZA, S. F. Geração de um modelo digital de elevação híbrido a partir de dados altimétricos diferentes em tipo e precisão. **Pesquisa**, Porto Alegre, RS, v. 37, n. 3, p. 205-217, 2010.

ENGELLEN, G.; HUYBRECHTS, B. A comparison of manual and automated slope maps. **Catena**, Amsterdam, v. 8, p. 239-249, 1981.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. **Manual ARC-HYDRO para aplicação do modelo MGB – IPH**: projeto integrado de cooperação amazônica e de modernização do monitoramento hidrológico. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 2009.

GARCIA, M. J. L.; CAMARASA, A. M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.**, Enschede, v. 1, no. 3-4, p. 187-195, 1999.

GIONNONI, F.; ROTH, G.; RUDARI, R. A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. **Adv. Water Resour.**, Southampton, v. 28, p. 567-581, 2005.

GRIMALDI, S. et al. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. **Adv. Water Resour.**, Southampton, v. 30, p. 2151-2158, 2007.

HANCOCK, G. R. et al. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. **Earth Surf. Processes Landf.**, Sussex, v. 31, p. 1394-1412, 2006.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Maryland, USA, v. 54, no. 11, p. 1593-1600, 1988.

- JOHNSTON, E. G.; ROSENFELD, A. Digital detection of pits, peakes, ridges and ravines. **IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern.**, New York, v. 5, no. 4, p. 472-480, 1975.
- LIN, W. T. et al. Automated suitable drainae network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 20, p. 289-306, 2006.
- LINDSAY, J. B.; EVANS, M. G. The influence of elevation error on the morphometrics of channel networks extracted from DEMs and the implications for hydrological modelling. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 22, p. 1588-1603, 2008.
- LIU, X.; ZHANG, Z. Drainage network extraction using LIDAR-derived DEM in volcanic plains. **AREA**, Buenos Aires, v. 43, no. 1, p. 42-52, 2011.
- MARK, D. M. Automated detection of drainage networks from digital elevation model. **Cartographica**, Toronto, v. 21, no. 2/3, p. 168-178, 1984.
- MARKS, D.; DOZIER, J.; FREW, J. Automated basin delineation from digital elevation data. **Geoprocessing**, in Digital Picture Processing, Journal of the ACM Amsterdam, v. 2, p. 299-311, 1984.
- MARTZ, L. W.; JONG, E. CATCH: a FORTRAN program for measuring catchment area from Digital Elevation Models. **Comput. & Geosci.**, New York, v. 14, no. 5, p. 627-640, 1988.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Rev. Bras. Cartogr.**, Rio de Janeiro, n. 61, p. 137-151, 2009.
- METZ, M.; MITASOVA, H.; HARMON, R. S. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. **HESS**, Munich Germany, v. 15, p. 667-678, 2011.
- MOHARANA, P. C.; KAR, A. Watershed simulation in a sandy terrain of the Thar desert using GIS. **J. Arid Environ.**, London, v. 51, p. 489-500, 2002.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Source areas, drainage density and channel initiation. **Water Resour. Res.**, Washington, D.C., v. 25, no. 8, p. 1907-1918, 1989.
- MORRIS, D. G.; HEERDEGEN, R. G. Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 1, p. 131-141, 1988.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, ScienceDirect, Elsevier B. V, Amsterdam, v. 28, p. 323-344, 1984.
- OLIVEIRA, A. H. et al. Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do Horto Florestal Terra Dura, Eldorado do Sul, RS. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 36, p. 1259-1267, 2012.
- OLIVEIRA, P. T. S. et al. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.**, Campina Grande, v. 14 n. 8 , p. 819-825, 2010.

OLIVEIRA, S. N. et al. Delimitação automática de bacias de drenagens e análise multivariada de atributos morfométricos usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido. **Rev. Bras. Geomorfol.**, Uberlândia, v. 8, n. 1, p. 3-21, 2007.

OZDEMIR, H.; BIRD, D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environ. Geol.**, Berlin, v. 56, p. 1405-1415, 2009.

PEUCKER, T. K.; DOUGLAS, D. H. Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Comput. Graph. Image Process.**, New York, v. 4, p. 375-387, 1975.

PILOTTI, M.; GANDOLFI, C.; BISCHETTI, G. B. Identification and analysis of natural channel networks from digital elevation models. **Earth Surf. Process. Landf.**, Sussex, v. 21, p. 1007-1020, 1996.

PINHEIRO, E. S.; KUX, H. J. H.; VILLWOCK, J. A. O potencial de imagens QUICKBIRD para análise de um setor do Planalto das Araucárias, RS: Centro de Pesquisas e Conservação da natureza Pró-Mata. **Rev. Bras. Geomorfol.**, Uberlândia, v. 6, n. 2, p. 65-73, 2005.

POGGIO, L.; SOILLE, P. A probabilistic approach to river network detection in digital elevation models. **Catena**, Amsterdam, v. 87, p. 341-350, 2011.

POGGIO, L.; SOILLE, P. Influence of pit removal methods on river network position. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 26, p. 1984-1990, 2012.

RAYBURG, S.; THOMS, M.; NEAVE, M. A comparison of digital elevation models generated from different data sources. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 106, p. 261-270, 2009.

SEYLER, F. et al. Watershed delineation for the Amazon sub-basin system using GTOPO30 DEM and a drainage network extracted from JERS SAR images. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 23, p. 3173-3185, 2009.

SOFIA, G. et al. An objective approach for features extraction: distribution analysis and statistical descriptors for scale choice and channel network identification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Munich Germany, v. 15, p. 1387-1402, 2011.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geol. Soc. Amer. Bull.**, New York, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952.

STROBL, R. O.; FORTE, F. Artificial neural network exploration of the influential factors in drainage network derivation. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 21, p. 2965-2978, 2007.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resour. Res.**, Washington, D.C., v. 33, no. 2, p. 309-319, 1997.

TOMAZONI, J. C. et al. Uso de modelo digital de elevação gerados a partir do ASTER GDEM e SRTM para a caracterização de rede de drenagem. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, PE, v. 2, p. 365-376, 2011.

TORIWAKI, J. I.; FUKUMURA, T. Extraction of structural information from grey pictures. **Comput. Graph. Image Process.**, New York, v. 7, p. 30-51, 1978.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Appl. Geogr.**, Oxford, v. 32, p. 300-309, 2011.

VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 53, p. 281-298, 2003.

WALCOTT, R. C.; SUMMERFIELD, M. A. Scale dependence of hypsometric integrals: an analysis of southeast African basins. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 96, p. 174-186, 2008.

WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, Munich Germany, v. 11, p. 1481-1500, 2007.

YANG, X. et al. The scaling method of specific catchment area from DEMs. **Journal of Geographical Sciences**, Beijing, China, v. 21, n. 4, p. 689-704, 2011.

YIN, Z. Y.; WANG, X. A cross-scale comparison of drainage basin characteristics derived from digital elevation models. **Earth Surf. Process. Landf.**, Sussex, v. 24, p. 557-562, 1999.

ZEILHOFER, P. Modelação de relevo e obtenção de parâmetros fisiográficos na bacia do rio Cuiabá. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Recife, PE, v. 6, n. 3, p. 95-109, 2001.

**Data de submissão:** 30.07.2014

**Data de aceite:** 20.08.2014

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.