

# COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO LAGO PARANOÁ

Felipe Lima Ramos BARBOSA<sup>1</sup>

Renato Fontes GUIMARÃES<sup>2</sup>

Osmar Abílio CARVALHO JUNIOR<sup>3</sup>

Roberto Arnaldo Trancoso GOMES<sup>4</sup>

## Resumo

O Brasil possui uma vasta e rica rede de drenagem cujos recursos hídricos são utilizados para os mais diversos fins, tais como uso urbano, industrial, agropecuário, dentre outros, constituindo-se em um bem de domínio público dotado de valor econômico e natureza limitada. Sendo assim é de suma importância priorizar sua eficiente gestão a fim de garantir a devida disponibilidade quali-quantitativa às gerações futuras. Com isso, a própria Lei das Águas preconiza a bacia hidrográfica como unidade territorial de implementação das ações da mencionada legislação. No caso específico do Distrito Federal (DF), a gestão dos recursos hídricos de competência distrital utiliza as conceituadas Unidades Hidrográficas (UH) provenientes do *Mapa das Unidades Hidrográficas do DF*, elaborado pela extinta Secretaria de Meio Ambiente, Tecnologia e Ciência – SEMATEC, em 1994. Com o intuito de delimitar as 36 UH's utilizando-se de técnicas de geoprocessamento e compará-las as atuais e vigentes poligonais, foi necessário a comparação entre dois métodos de estimativa de direção superficial de fluxo, o D8 e o  $D_{\infty}$  na delimitação das cinco UH da bacia hidrográfica do lago Paranoá. Os resultados, que serão devidamente detalhados ao longo do artigo, demonstraram que o método D8 é o mais adequado para a finalidade da pesquisa, comparado ao método  $D_{\infty}$ . Esses resultados demonstram e reforçam que a dispersão de fluxo superficial, intrínseco ao método  $D_{\infty}$ , é inconsistente com a delimitação física de áreas de contribuição. Assim, o método D8 mostrou-se o mais adequado e foi, de fato, utilizado nas estimativas das 36 UH supramencionadas.

**Palavras-chave:** Recursos hídricos. Bacias hidrográficas. Modelo Digital de Elevação – MDE. Consistência hidrológica. Unidades Hidrográficas. Ordenamento territorial.

<sup>1</sup> Geógrafo. Mestre em Gestão Territorial e Ambiental pela Universidade de Brasília (UnB). Analista ambiental do Ministério do Meio Ambiente (MMA) - E-mail: felipe.barbosa@mma.gov.br

<sup>2</sup> Engenheiro Cartógrafo. Doutor em geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e pós-doutorado pela *University of Washington*. Professor adjunto no departamento de geografia da Universidade de Brasília (UnB) - E-mail: renatofg@unb.br

<sup>3</sup> Geólogo. Doutor em geologia pela Universidade de Brasília (UnB) e pós-doutorado pela *University of Washington*. Professor titular no departamento de geografia da Universidade de Brasília (UnB) - E-mail: osmarjr@unb.br

<sup>4</sup> Geógrafo. Doutor em geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professor titular no departamento de geografia da Universidade de Brasília (UnB) - E-mail: robertogomes@unb.br

## Abstract

### Comparison between Hydrographic Units delimitations methods in Paranoá Lake watershed

Brazil has a vast and a rich natural drainage network and this water resource has been utilized for numerous and varied uses, for example: urban use, industrial, farming/livestock, and others. This Brazilian natural resource has a public domain, with monetary value and is therefore covered under the Legal aspects on Brazilian land use and water resources legislation. Indeed, it is extremely important to prioritize its efficient management to enable the outstanding quali-quantitative availability of this precious natural resource for future generations. The Water's Law denotes the watershed boundaries' and uses these boundaries as a territorial land unit to enable the implementation of the prescribed actions for water usage in the above mentioned legislation. With regards to Distrito Federal's limits, its water resources management uses the concept of Hydrographic Units (HU) as has been derived from the *Map of Hydrographic Units from Distrito Federal - DF*, elaborated for extinct Secretariat of Environment, Technology and Science from the local government, in 1994. In order to extract the 36 (HU) using geoprocessing techniques and compare them to those actually in use, according to Distrito Federal's Hydrographic Units map, it has brought forwards a discussion regarding the use of two different methods for estimate the superficial flow direction, D8 and  $D_{\infty}$ , applied to accuracy extract of five HU located within Paranoá Lake watershed. The results have shown that D8 method is more adequate then  $D_{\infty}$  limited to the aim of this research. These results show and reinforce that dispersion in superficial flow direction, intrinsic to  $D_{\infty}$  method, is inconsistent within delimitation of contribution areas process. Thus D8 method has shown more adequate and was, indeed, used to estimate the 36 HU mentioned above.

**Key words:** Water resources. Watershed. Digital Elevation Model - DEM. Hydrological consistency. Hydrographic Units. Territorial management.

## INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em posição confortável quanto a disponibilidade de seus recursos hídricos, em termos globais. Essa informação é justificada pelas satisfatórias estimativas nos valores de disponibilidade hídrica *per capita*, se comparadas com outros países. Porém esse aparente conforto é irreal, uma vez que 80% da disponibilidade hídrica encontra-se na Região Hidrográfica (RH) Amazônica, o que traz a tona a importância e necessidade na gestão do uso e manutenção de tal recurso natural (BRASIL, 2012). Diante de tal demanda torna-se inquestionável a preservação e a gestão, em bases sustentáveis, dos recursos hídricos e das suas respectivas bacias hidrográficas, ações estas que, de fato, se tornaram uma das principais preocupações governamentais e sociais da atualidade. De encontro a esse raciocínio, a própria Lei das Águas (art. 1º, inciso V da Lei nº 9.433/97) preconiza a bacia hidrográfica como unidade territorial de implementação das ações voltadas à gestão de precioso e limitado recurso natural hídrico.

É cada vez maior a quantidade de órgãos públicos e associações que buscam desenvolver a gestão dos recursos hídricos com base em bacias hidrográficas, na tentativa de sistematizar o escopo, por um lado, de disponibilidade e, por outro, de demanda pelo uso da água, possibilitando o crescimento e a produção. Resumidamente, a gestão ambiental deve estar baseada no balanço hídrico e na renovação do sistema natural, o que se encaixa perfeitamente na lógica de gerenciamento por bacias hidrográficas.

Assim, o gerenciamento supramencionado é um importante instrumento que orienta o poder público, como principal tutor do meio ambiente e a sociedade na tarefa compartilhada de utilização e monitoramento dos recursos naturais hídricos, econômicos e socioculturais, de forma a promover o desenvolvimento sustentável (LANNA, 1995).

Dentre alguns princípios fundamentais que devem ser considerados em qualquer processo de gerenciamento de recursos hídricos, a bacia hidrográfica deve ser adotada como unidade de planejamento (GALVÃO, 2004), sendo que essa preocupação foi absorvida na constituição dos dispositivos que determinam a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, instituída pela Lei nº 9.433/97. O citado diploma legal determina que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação e operacionalização da PNRH (art. 1º, V), bem como a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH. Logo as ações que devem ser tomadas, em âmbito da gestão hídrica, devem considerar como base as bacias hidrográficas, para os Estados e a União, consolidando assim a exigência de um sistema único de codificação.

As bacias hidrográficas podem fornecer informações morfométricas importantes para a elaboração, por exemplo, dos planos de recursos hídricos. O estudo deste ente geomorfológico pode ter abordagem a partir de duas óticas, uma morfométrica e a outra dinâmica (PINTO et al., 1973; LLAMAS, 1993; SILVEIRA, 2001 apud OLIVEIRA, 2008). Com relação ao estudo morfométrico pode-se ilustrar a obtenção de informações referentes à hierarquia fluvial, análise areal, linear e hipsométrica extraídas de fotografias aéreas, cartas topográficas e imagens de satélites, sendo que estas fornecem informações de caráter físico a respeito das bacias hidrográficas. Já a perspectiva dinâmica pode ser entendida como a elaboração de índices estatísticos e modelos matemáticos a partir de amostras coletadas em campo, com certa periodicidade, referentes à precipitação, infiltração, percolação, escoamento superficial, evaporação e evapotranspiração, entre outros. Vale ressaltar que estas duas óticas, morfométrica e dinâmica, muitas vezes caminham juntas na elaboração de modelos ambientais, como pode ser observado, por exemplo, em trabalhos de estimativa de previsão de escorregamentos rasos (GUIMARÃES et al., 2003).

Contudo, a informação primordial para a delimitação e a estimativa da morfometria das bacias hidrográficas é o conhecimento prévio do comportamento e variação altimétrica do local de estudo. Segundo Barros (2006), a crescente preocupação com os recursos hídricos ocasiona um aumento pelo interesse em estudos que envolvam a temática das bacias hidrográficas que, *a priori*, necessitam de dados e informações altimétricas como insumos para sua derivação.

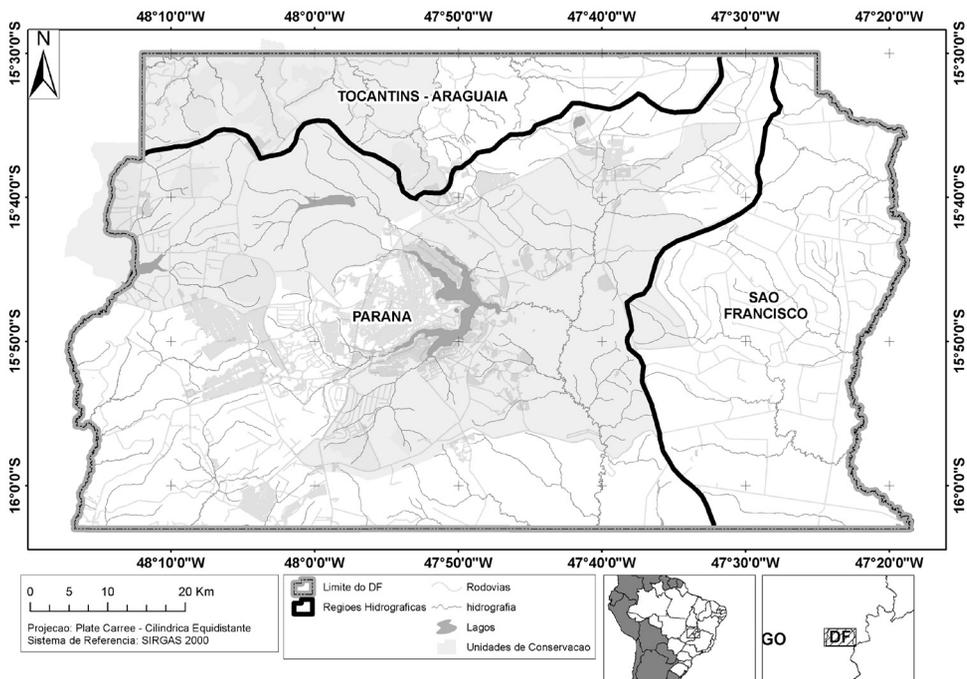
Desde a última década do século XX, o geoprocessamento começou a ser difundido no trato de informações geográficas e, num enfoque maior, informações que possuem um caráter espacial. Este termo vem sendo confundido com termos mais genéricos, tais como geomática, geoinformações e geotecnologias. Estas últimas genericamente englobam todo o conjunto de tecnologias e métodos que lidam com dados geográficos, tais como o Sistema de Informação Geográfica – SIG, a Cartografia Digital e o Sensoriamento Remoto, que possuem cada um suas características distintas. Porém, o uso dessas técnicas deve ser feito segundo o controle metodológico adotado, considerando suas limitações, que vão desde os limites operacionais até o desconhecimento cartográfico da área de estudo (FERNANDES, 2009). Ainda, de acordo com Christofolletti (1999), os procedimentos operacionais para a modelagem de sistemas ambientais ganharam destaque e nova *performance* no contexto do geoprocessamento.

Nos dias de hoje existem as mais variadas fontes de dados altimétricos em formato digital. Esses modelos conferem objetividade e eficiência, além de ganho

computacional, no cruzamento e derivação de outras informações descritivas do relevo, tais como o objeto de interesse deste trabalho, as bacias hidrográficas.

Pode-se citar, a título de exemplo de trabalhos que derivaram informações a partir destes modelos altimétricos: (i) a delimitação e extração de *ottobacias* na bacia hidrográfica do rio Verde Grande, afluente do rio São Francisco, que discutiu a respeito da utilização de MDE na gestão dos recursos hídricos (BARBOSA, 2007); (ii) o trabalho científico com o objetivo de apresentar uma metodologia de delimitação automatizada de bacias de drenagem e a inserção de novos parâmetros morfométricos para a realização de análise multivariada com a finalidade de caracterizar os compartimentos geomorfológicos na área de estudo do PARNA Serra dos Órgãos, no estado do Rio de Janeiro (OLIVEIRA, 2008); (iii) e, o trabalho que utilizou as informações provenientes de MDE em ambiente urbano para identificação de áreas com alta probabilidade de ocorrências de voçorocas, no Gama, cidade-satélite do Distrito Federal (FREITAS, 2005).

Em termos estratégicos, o Distrito Federal é uma área fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, mesmo em nível nacional, uma vez que é composto pelas cabeceiras de três das mais significativas bacias hidrográficas brasileiras, cujas águas banham a região norte, nordeste e centro-sul. Assim, é de suma importância manter o adequado manejo do solo para garantir a devida qualidade/quantidade necessária dos recursos hídricos a fim de atender seus usos internos, bem como externos, nas referidas bacias hidrográficas. A figura 1 apresenta as principais bacias hidrográficas no âmbito do Distrito Federal.



**Figura 1 - Representação espacial das principais bacias hidrográficas no âmbito do Distrito Federal**

A gestão deste recurso natural no contexto do Distrito Federal possui suas particularidades, mesmo que baseado na delimitação morfométrica por bacias das unidades de planejamento, comumente conhecidas como Unidades Hidrográficas – UH. Essa metodologia, resumidamente, consiste da fragmentação das 3 (três) supracitadas bacias hidrográficas que compõem o cenário hidrográfico do DF.

A respectiva fragmentação das bacias hidrográficas em unidades de planejamento, ou Unidades Hidrográficas – UH, fazem parte do produto cartográfico intitulado *Mapa das Unidades Hidrográficas do DF*, de 1994, elaborado pela extinta Secretaria de Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia em parceria com a Companhia de Planejamento do Distrito Federal.

Visto as limitações tecnológicas à época desta cartografia, a hipótese levantada consiste de que existam discrepâncias entre os traçados dos divisores d'água deste mapeamento se comparados com os divisores d'água gerados a partir das técnicas mais atuais. O estudo completo de estimativa das 36 UH do Distrito Federal

Essa preocupação motivou o desenvolvimento metodológico, a ser apresentado nesse artigo, com o objetivo de comparar e discutir a relevância da escolha do método de estimativa de fluxo direcional e acumulação de fluxo superficial em processos de derivação morfométrica, aqui limitados as soluções intituladas D8 (O'CALLAGHAN; MARK, 1984) e D $\infty$  (TARBOTON, 1997). Essa discussão é focada em identificar limitações e potencialidades inerentes a cada solução em processos de estimativa de áreas de contribuição, e subsequentes bacias hidrográficas. Para tal, serão considerados dois cenários de MDE, um com resolução espacial mais refinada em relação ao outro.

Cabe ressaltar que o processo de estimativa das 36 UH do Distrito Federal utilizando-se uma proposta de MDEHC, tomando por base os resultados apresentados nesse artigo, encontra-se detalhado em Barbosa (2012).

## REFERENCIAL TEÓRICO

A seção referente a discussão teórico-conceitual que foi utilizada como base para a realização das citadas comparações metodológicas apresenta temáticas conceituais e técnicas associadas à geoestatística e interpolação de dados amostrais, princípios de modelagem hidrológica e métodos de estimativa de fluxo direcional.

### *Modelo Digital de Elevação*

O relevo sempre foi um dos fatores preponderantes no processo de ocupação da humanidade, sendo também um agente regulador na distribuição no fluxo de água e energia dentro dos ecossistemas (MARTZ et al., 2000). A água é um dos principais fatores exógenos que modelam o relevo, principalmente em encostas, por meio dos processos erosivos naturais ou causados por atividades antrópicas. Por isso a importância de modelá-lo, considerando-o como uma feição tridimensional, para obtenção de resultados quali-quantitativos com a finalidade de subsidiar estudos de problemas de engenharia e ambientais, tal como obter informações numéricas das formas do relevo.

Existem diversas formas de dados para representar o relevo, tais como os provenientes de imageamento interferométrico por radar, a exemplo do SRTM, bem como técnicas mais atuais envolvendo o levantamento a laser LIDAR (*Light Detection*

*And Ranging*), o último oferecendo uma alternativa para os levantamentos *in situ* e para as técnicas de mapeamento fotogramétrico na aquisição de dados de elevação (MAUNE, 2001).

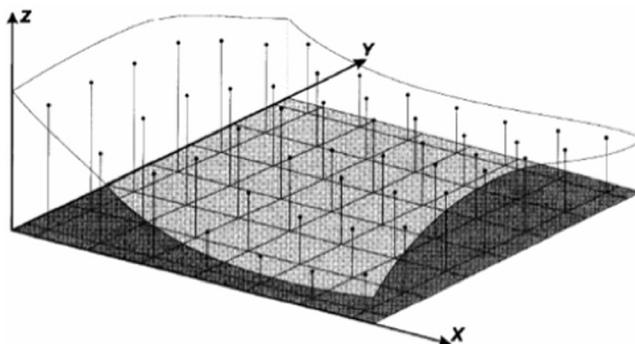
Das diversas técnicas envolvidas na extração e derivação de informações altimétricas, uma bastante empregada é a interpolação, determinística ou probabilística, de dados amostrais, que são facilmente implementados em ambiente computacional, resultando na representação digital da variação contínua do relevo no espaço, ou Modelo Digital de Elevação - MDE (CHAVES, 2002). As técnicas de interpolação, na maioria das vezes, utiliza-se de preceitos da geoestatística para a definição dos valores a serem estimados com base na distribuição espacial de um conjunto amostral de referência.

Entende-se por geoestatística o ramo de estudo, no âmbito da geomática ou geoprocessamento, que envolve um conjunto de procedimentos de análise e inferência dos fenômenos espaciais, que apresentam uma dependência espacial, em função de uma autocorrelação no espaço (DRUCK, 2002). Esses procedimentos correspondem à definição de um modelo matemático que expresse esta autocorrelação espacial *a priori* e que objetive representar a variabilidade espacial de um atributo considerando uma superfície contínua, no caso o MDE. Esses são procedimentos matemáticos que visam entender a variação e correlação espacial de um atributo e podem ser aplicados, na prática, a qualquer fenômeno, tais como concentração de poluentes, variação de teor de zinco no solo, representações altimétricas da superfície da Terra, entre outros, apesar de terem origem no ramo da mineração (KRIGE, 1951 apud DRUCK, 2002). Assim, a geoestatística fornece os entendimentos e subsídios para a definição, na maioria das vezes, das relações matemáticas a serem consideradas no processo de interpolação propriamente dito.

Segundo Valeriano e Rossetti (2010), o processo de interpolação, de maneira simples, é a estimativa da informação em locais não observados (não amostrados) a partir de observações (amostras) tomadas em sua vizinhança. Resumidamente, num primeiro momento o pesquisador dispõe de amostras de valores, no caso a altimetria, de postos de coleta, podendo ser provenientes de diversas fontes primárias ou secundárias de dados. Após o processo de interpolação é possível estruturar a informação desejada de modo contínuo no espaço digital, referente aos valores de cada célula nas linhas e colunas de uma imagem digital. Assim os MDE podem ser estruturados numa representação digital *pixel a pixel* cujos valores de altimetria podem ser construídos a partir das informações primárias de curvas de nível e pontos cotados (VALERIANO et al., 2010).

Os MDE podem ser estruturados em malhas regulares ou irregulares. As regulares modelam matematicamente o terreno a partir de representações poligonais como o quadrado e retângulo (SANTOS et al., 2001), sendo essas atualmente bastante difundidas junto aos Sistemas de Informação Geográfica (SAKUDE, 1992). A figura 2 mostra um exemplo de representação em grade regular de uma porção hipotética da superfície.

Já os modelos baseados em malhas irregulares ou de Rede Irregular de Triangulação (*Triangulated Irregular Network* - TIN) utilizam triângulos em sua implementação. Esses consistem de triangulações a partir de pontos irregularmente distribuídos pelo terreno com atributos X, Y e Z, que equivalem, respectivamente, à longitude, latitude e altitude tomando, por base, um sistema de referência pré-definido. Esse modelo depende do grau do polinômio empregado e da quantidade e qualidade dos pontos utilizados (ARCKERMANN, 1996; SANTOS et al., 2001).



**Figura 2 - Representação em malha regular (células quadradas) de parte de uma superfície hipotética**

Fonte: Câmara; Medeiros, 1998

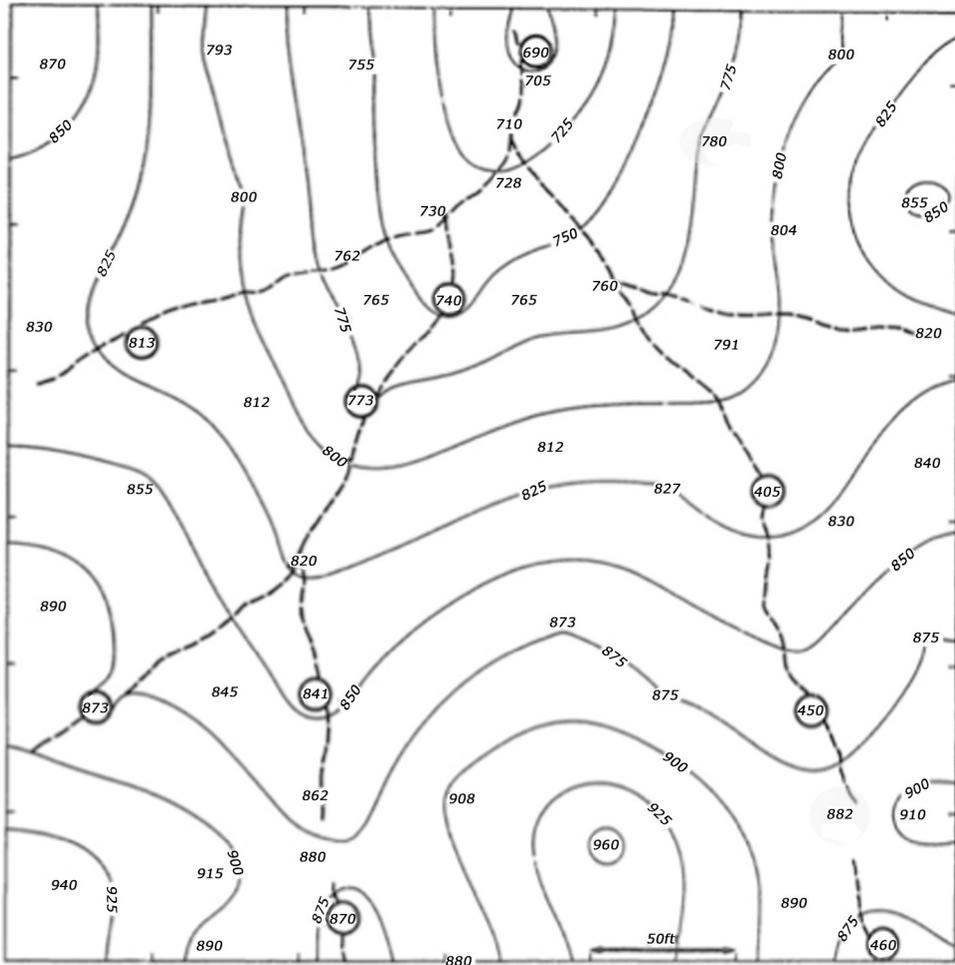
Vale lembrar que nos modelos regulares a resolução espacial, isto é, o tamanho da célula (*pixel*) em X e Y é de suma importância, pois está relacionada diretamente com a exatidão da representação da superfície, tais como a forma de armazenamento do dado, o processo de amostragem e o interpolador utilizado (ESRI, 1996). Assim a escolha da resolução espacial deve estar diretamente relacionada com o objetivo de aplicação do estudo, observando os padrões cartográficos referentes à escala do dado original (BRASIL, 1984).

Dentre vários métodos de interpolação, tanto locais, como o IDW, quanto globais (Krigagem e o Spline), o método de interpolação TOPOGRID (HUTCHINSON, 1989) foi especificamente desenvolvido com o objetivo de criação de MDE hidrologicamente consistentes por meio do uso de dados amostrais de elevação e da rede hidrográfica, sendo que esse é otimizado uma vez que possui a eficiência dos interpoladores "locais" sem perder a continuidade do terreno tais como os interpoladores "globais" (HUTCHINSON, 1989).

O interpolador possui tal comportamento devido à aplicação mútua de um interpolador global, para a obtenção dos dados altimétricos, junto a um interpolador local, que possui a função de melhor obter os locais de mudanças abruptas, tais como depressões espúrias, que frequentemente estão associadas a rios e córregos (HUTCHINSON, 1989).

Em linhas gerais, o TOPOGRID realiza a correção hidrológica do modelo e a identificação dos canais de drenagem por meio da aplicação de um algoritmo que tem o objetivo de identificar e eliminar as falsas depressões, que muitas vezes estão associadas a esses canais de drenagem, e são responsáveis pela descontinuidade da rede, aspecto desfavorável em determinados estudos hidrológicos. A figura 3 mostra uma representação hipotética contendo curvas de nível e as depressões espúrias, comumente geradas pelos processos de interpolação.

As características morfométricas de elevação de cada célula (*pixel*) da malha regular são interpoladas por meio de diversas interações, determinadas pelo usuário. O interpolador inicialmente gera uma matriz-base preliminar para, sucessivamente, calcular resoluções mais afinadas até atingir a resolução espacial determinada pelo usuário (HUTCHINSON, 1989), sendo que a incorporação de dados vetoriais da rede hidrográfica no processo possibilita a elaboração de MDE que representem com mais acurácia o relevo e, conseqüentemente, o comportamento do fluxo superficial da água.



**Figura 3 - Representação hipotética do relevo contendo curvas de nível, depressões espúrias (círculos pretos) e canais de drenagem (linhas tracejadas)**

Fonte: Adaptado de Hutchinson, 1989

Porém, apenas a aplicação desse método de interpolação não garante a total consistência hidrológica do modelo, devido à geração de depressões espúrias remanescentes no decorrer do processamento, sendo necessária uma etapa de pós-processamento, em que se realizará a consistência hidrológica focada ao objetivo da discussão.

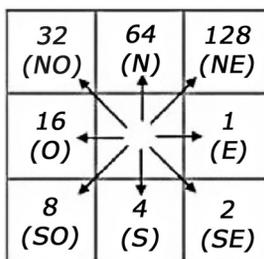
### *Princípios de modelagem hidrológica e métodos de estimativa de fluxo direcional*

Visto que a água é um dos principais agentes erosivos do relevo, o estudo de seu comportamento e consequências sobre a superfície pode ser feito com o auxílio dos modelos matemáticos, sejam distribuídos ou concentrados. Independente da estruturação do modelo adotado todos devem ter parâmetros de calibração, tais como a identificação da drenagem numérica, informação que é obtida com o auxílio dos MDE.

Um dos pontos básicos ao se trabalhar com modelos hidrológicos consiste na representação fidedigna tanto do relevo, como da estrutura hidrológica presente. Sendo que este último quesito implica em obter a máxima coincidência entre o trajeto de escoamento superficial da água no modelo, obtido de forma matemática, com a hidrografia mapeada em questão (HUTCHINSON, 1996).

Uma proposta de derivação do fluxo superficial da água é baseada na construção da drenagem numérica a partir do modelo matemático de elevação, no formato regular. Para tal é de suma importância identificar o caminho preferencial descendente do fluxo superficial de cada célula do modelo. Existem diversos trabalhos sobre essa abordagem, tais como Quinn (1991), Lea (1992), Costa-Cabral (1994), entre outros. Os que serão aqui abordados são o modelo de fluxo direcional D8, proposto inicialmente por O'Callaghan e Mark (1984), e o modelo de fluxo direcional D $\infty$  (TARBOTON, 1997).

O método de estimativa de fluxo superficial de única direção ou unidirecional, conhecido como D8 (determinístico de 8 células), determina a direção preferencial do escoamento superficial da água, adjacente ou diagonal, por meio da direção de maior declive, entre o pixel central e as oito células vizinhas no MDE (TARBOTON, 1997), ou seja, as oito direções – norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, noroeste e oeste. A utilização de modelos que visam estimar o comportamento preferencial de escoamento superficial da água sob o terreno tem importância nos mais diversos tipos de modelagens hidrológicas, tais como estudos de saturação de solo, propensão a alagamento e zonas susceptíveis a erosão, entre outros. A figura 4 mostra a metodologia de única direção, conforme o modelo de estimativa D8.



**Figura 4 - Ilustração das oito possibilidades de escoamento superficial para cada célula do modelo, método D8**

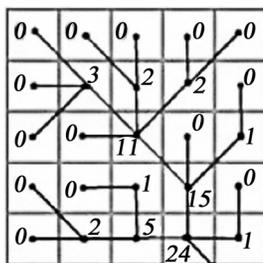
Fonte: Adaptado de Chaves, 2002.

Por sua vez, o modelo de fluxo acumulado derivado do método D8 consiste na área de drenagem a montante para cada célula do MDE. Segundo Wallis *et al.* (2009), a área de contribuição de um determinado pixel corresponde à sua própria área

acrescida das áreas dos pixels vizinhos que drenam diretamente para ele. A Equação 1 expressa a lógica de área de contribuição implementada.

$$A(x_i) = 1 + \sum A(N) \quad (1)$$

Onde  $A(x_i)$  representa a área de contribuição de uma determinada célula e  $A(N)$  representa a área de contribuição de  $N$  células a montante que drenam diretamente para a célula de interesse, conforme o modelo direcional D8. A figura 5 mostra o modelo de acumulação derivado da estimativa de fluxo direcional D8, bem como os valores da área de drenagem, expresso em valor de células.



**Figura 5 - Modelo hipotético de acumulação do fluxo direcional do método D8**

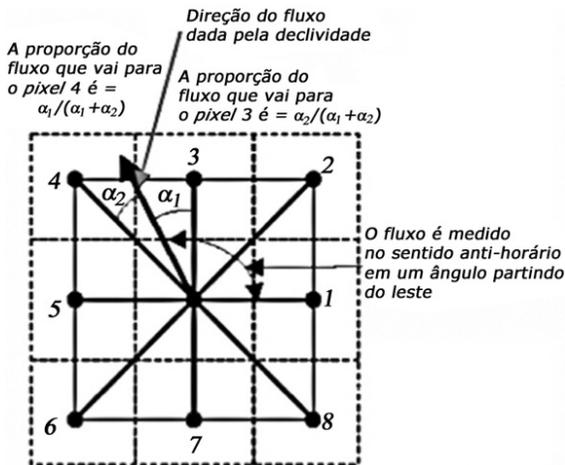
Fonte: Adaptado de Chaves, 2002.

Porém, a grande dificuldade de implementação do método D8 para as estimativas de área de contribuição é a presença de depressões espúrias no MDE, inerente ao próprio método de interpolação, que por sua vez devem ser previamente corrigidas já que essas podem ocasionar a mudança de direção, de forma significativa, no escoamento superficial.

Outra proposta de cálculo de fluxo direcional é conhecida como  $D_{\infty}$ , desenvolvido por Tarboton (1997). Diferente do método D8, tal procedimento considera oito triângulos para uma janela de 3x3, centralizado na célula de interesse. Quando o fluxo superficial no modelo não segue as direções cardinais ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) e diagonais ( $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ ) é adotado um sistema proporcional que pondera o fluxo segundo o ângulo entre o escoamento identificado e o caminho preferencial (cardinal ou diagonal) mais próximo a esse.

Diferente do método D8, certa dispersão é introduzida no processo devido à proporcionalidade de distribuição do fluxo entre as duas células a jusante, uma vez que esse cálculo ponderado é realizado dentro de um dos oito triângulos no qual o fluxo coincidir (TARBOTON, 1997).

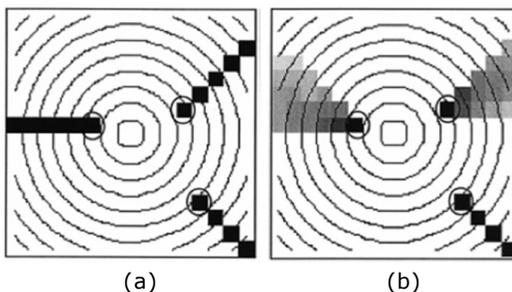
A figura 6 ilustra o método  $D_{\infty}$  sob um modelo hipotético de 9 células. O vetor de direção de fluxo superficial é dado entre um dos 8 triângulos formados pelos centroides das células, conforme a estimativa de maior declividade. Uma vez identificado o respectivo triângulo de escoamento, o escoamento superficial para as duas células a jusante é ponderado dentro de um patamar de  $45^{\circ}$ , conforme ilustrado.



**Figura 6 - Método  $D_\infty$  de fluxo o qual adota o caminho preferencial de acordo com a declividade**

Fonte: Adaptado de Tarboton, 1997.

Quando a direção de fluxo no cálculo acima apresentado é semelhante às direções cardinais e diagonais (referente aos lados dos 8 triângulos formados), a resposta do método  $D_\infty$  será igual ao esperado pelo método  $D_8$ , e ambos estão corretos. Entretanto, quando a declividade topográfica não está alinhada com tais eixos, o resultado é bem diferente. Assim o  $D_8$  não produz nenhuma dispersão de fluxo enquanto o  $D_\infty$  introduz alguma (TARBOTON, 1997). A figura 7 apresenta a comparação do escoamento utilizando os dois métodos em uma mesma matriz hipotética.



**Figura 7 - Comparação de métodos de direção de fluxo. (a) Única direção,  $D_8$ . (b) Duas direções,  $D_\infty$**

Fonte: Adaptado de Tarboton, 1997.

Observa-se o mesmo comportamento de direção no canto direito inferior, devido à equivalência entre declividade na matriz e a direção (diagonal) de fluxo no método  $D_\infty$ .

## MATERIAIS E MÉTODOS

A presente seção tem a finalidade de apresentar os insumos e métodos empregados na etapa de comparação entre os 2 (dois) modelos de estimativa de fluxo superficial, o D8 e o D $\infty$ , voltados a delimitação das Unidades Hidrográficas da bacia hidrográfica do Lago Paranoá. O objetivo desta etapa foi compreender melhor em que medida a aplicação que cada um desses métodos de estimativa de fluxo direcional e área de contribuição pode influenciar na derivação das Unidades Hidrográficas (UH's), principalmente considerando o refinamento na resolução espacial do MDE (20 metros para 7 metros). Essa etapa teve o intuito de entender a influência do refinamento do modelo na resposta em cada método aqui considerado.

O processo metodológico consiste de etapas de: (i) correção vetorial dos dados geoespaciais utilizados de insumo na modelagem; (ii) elaboração do MDE e sua posterior consistência hidrológica; (iii) derivação dos modelos de fluxo direcional e acumulado para a estimativa e definição, isoladamente, das 5 (cinco) UH's que fazem parte da bacia hidrográfica do Lago Paranoá, área teste utilizada nessa comparação.

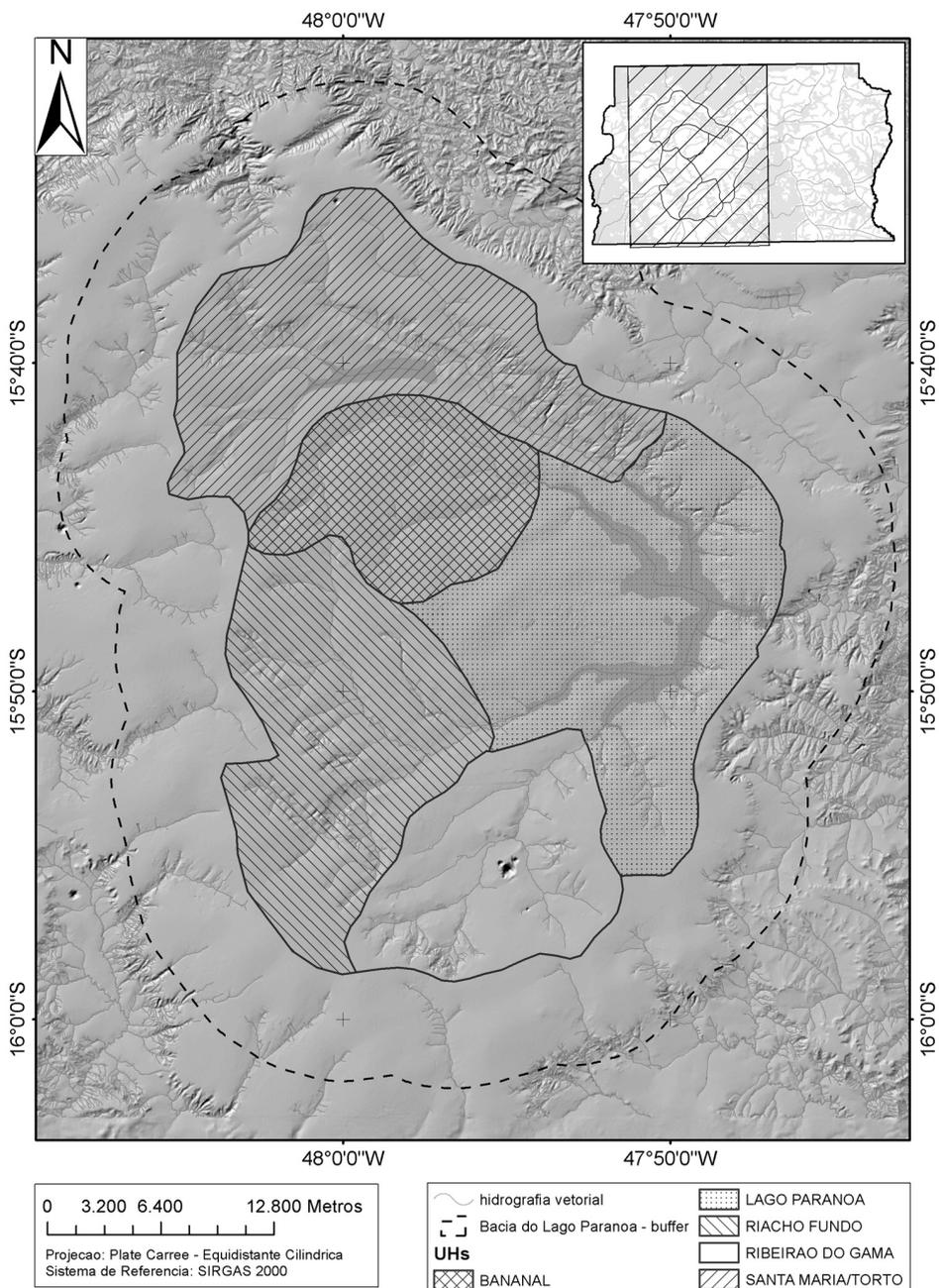
### *Correção vetorial dos dados geoespaciais de entrada*

Os dados vetoriais de insumo (pontos cotados, curvas de nível e rede hidrográfica) são provenientes do "novo" mapeamento do Distrito Federal elaborado pela Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal – Terracap, realizado no ano de 2010. Este levantamento cartográfico utilizou-se de técnicas de aerolevanteamento nas suas etapas de elaboração, sendo composto por 244 folhas articuladas no Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD) 1:10.000. Os produtos cartográficos derivados, inclusive os vetoriais encontram-se referenciados no sistema geodésico SIRGAS 2000.

O SICAD foi criado em 1976, por meio do decreto distrital nº 4.008/07, e é referência obrigatória para todo e qualquer trabalho de topografia, cartografia, demarcação, estudos de engenharia e de urbanismo no DF (BRASIL, 1977). Caracteriza-se pela representação cartográfica do DF no fuso UTM 23S expandido a oeste, cujo referencial geodésico, até o ano de 2010, era o Astro Datum Chuá.

Esse mapeamento passou por rigoroso controle de qualidade em cada etapa do processo de elaboração dos produtos inerentes ao aerolevanteamento (cobertura aerofotogramétrica, aerotriangulação, apoio de campo, edição das ortofotocartas e posterior edição em ambiente SIG), bem como seus produtos derivados, sejam vetoriais ou raster, encontram-se no "Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC" classe "A", de acordo com o Decreto nº 89.817/83. Essas cartas topográficas, na escala 1:10.000, contém planos de informação vetorial (hidrografia, curvas de nível, pontos cotados, entre outros), bem como a ortofoto utilizada no processo de levantamento cartográfico referente a cada articulação.

A bacia hidrográfica do Lago Paranoá foi selecionada pois encontrava-se totalmente inserida no DF, e possui dados na escala 1:10.000 provenientes do aerolevanteamento fotogramétrico, situação ideal para os testes pretendidos à época da pesquisa (BARBOSA, 2012). Conforme já mencionado, a bacia hidrográfica apresenta 5 (cinco) UH's segundo o mapeamento da Codeplan, essas objeto de interesse dessa etapa metodológica. São elas: (i) UH Santa Maria, (ii) UH Bananal, (iii) UH Riacho Fundo, (iv) UH Lago Paranoá e (v) UH Ribeirão do Gama. A figura 8, a seguir, apresenta o contexto espacial das citadas UH, bem como da bacia hidrográfica no recorte do Distrito Federal.



**Figura 8 - Unidades Hidrográficas pertencentes a bacia hidrográfica do Lago Paranoá**

A primeira correção realizada foi com relação aos pontos cotados que apresentavam valores altimétricos espúrios, que foram devidamente eliminados da amostra, e as curvas de nível em locais identificados de descontinuidade de traçado.

Uma vez corrigidas as inconsistências nos dados altimétricos, e visto que o interpolador que foi utilizado usa a rede hidrográfica para o refinamento da inferência altimétrica no espaço, essa teve os devidos ajustes topológicos segundo sua conectividade e direcionamento dos trechos de curso d'água, sendo que inconsistências observadas foram devidamente identificadas e corrigidas.

Uma vez organizados os dados de entrada, e devidamente corrigidos, passou-se para a etapa metodológica subsequente de interpolação e geração do MDE relativo a área de interesse.

### *Elaboração do modelo digital de elevação*

O MDE foi elaborado utilizando o módulo TOPOGRID (HUTCHINSON, 1989), do software ArcGIS 9.3.1. Esse método de interpolação foi escolhido, entre muitos outros existentes, por possibilitar a utilização da rede hidrográfica no processo de inferência espacial.

As resoluções espaciais adotadas, para os 2 (dois) cenários mencionados, foram de 20 e 7 metros, visto a hipótese de influência desse parâmetro na eficiência dos métodos de estimativa de fluxo e derivação da área de contribuição,  $D_8$  e  $D_\infty$ .

Inicialmente, a resolução espacial de 20 metros foi determinada visto a escala do Mapa de Unidades Hidrográficas – UH's, que é 1:100.000. Mesmo com a possibilidade da geração de um MDE com resolução espacial mais acurada, devido à utilização de dados de entrada referente ao aerolevantamento fotogramétrico 1:10.000, os mesmos foram degradados segundo as normas técnicas para a compatibilização com o insumo básico de comparação.

Destarte, a resolução espacial de 7 metros foi o melhor refinamento obtido, limitado a capacidade de *hardware*, frente a normatização técnica.

Segundo Barbosa (2007), essa etapa aplicada isoladamente sobre os dados altimétricos de entrada, não garante a total consistência hidrológica do modelo, devido a geração de depressões espúrias remanescentes no decorrer do processamento, sendo necessário uma etapa de pós-processamento, em que se realizará a consistência hidrológica nos moldes do método adotado.

### *Consistência hidrológica do MDE*

Após a etapa de geração do modelo altimétrico utilizando o algoritmo TOPOGRID, é necessário a realização da sua consistência hidrológica a fim de se obter o Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC).

Dessa forma, esta etapa visou à eliminação das depressões espúrias remanescentes do processo de interpolação, que se caracterizam por áreas ou células cercadas por vizinhas com valores altimétricos superiores (WALLIS et al., 2009), o que ocasiona a descontinuidade do escoamento superficial do modelo.

Para solucionar esse problema, O'Callaghan e Mark (1984) sugerem a aplicação de um filtro 3x3 para a identificação das áreas de depressão e do menor valor de altitude nesse perímetro, seguido da inversão de valores entre o ponto identificado e a depressão, conectando as células para que tenham um caminho superficial descendente disponível.

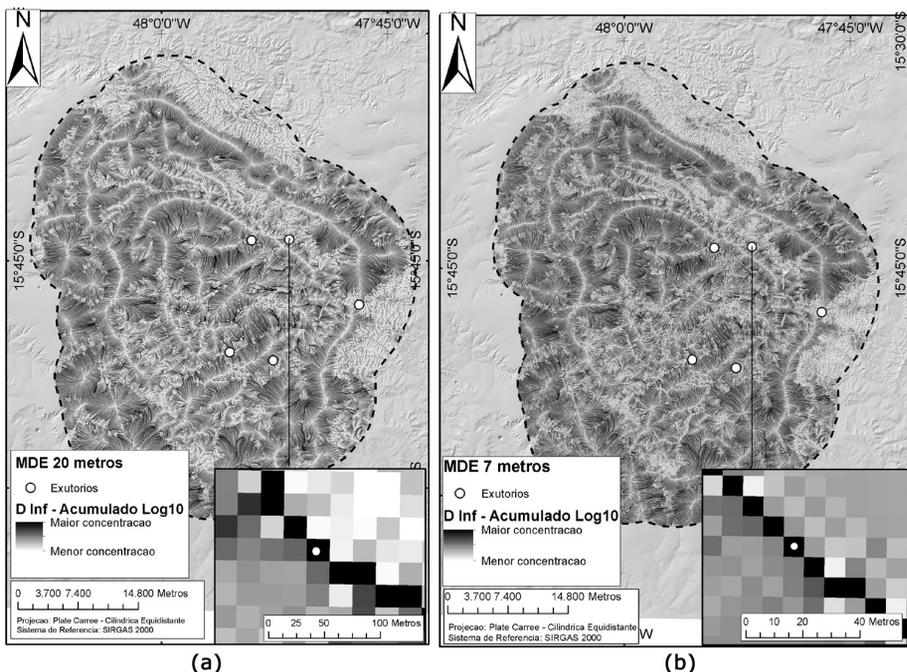
Além desta correção, a etapa de consistência hidrológica tem por objetivo garantir que a drenagem derivada do modelo seja coincidente com a rede hidrográfica vetorial utilizada, a proveniente do aerolevanteamento fotogramétrico 1:10.000.

Assim, essa etapa metodológica consistiu na aplicação dos algoritmos *Agree* e do *Fill Sink*, respectivamente, (i) voltados ao rebaixamento, imposição da rede de drenagem e constituição do talvegue ao modelo, e (ii) a estimativa e correção das depressões espúrias inerentes ao processo de interpolação por meio de convolução.

Cabe acentuar que, segundo Djokic (2008), após a utilização do algoritmo de imposição de drenagem *Agree*, principalmente para a estruturação de talvegues, é necessário a reaplicação do algoritmo referente ao preenchimento de depressões espúrias (*Fill Sink*), uma vez que essas podem vir a ser introduzidas pelo uso desse processo de imposição.

### Modelos de fluxo direcional e estimativa das 5 (cinco) Unidades Hidrográficas

Com base nos MDEHC's apresentados, foram estimados os 5 (cinco) exutórios (*outlets*) relativos a cada uma das UH's propostas para delimitação. Esses pontos de saída foram localizados com base na área de contribuição obtida pelo método  $D_{\infty}$ , isto é, a partir do ponto de maior concentração de fluxo para cada UH de referência. A figura 9 apresenta o método adotado de estimativa da área de contribuição a partir de exutórios definidos conforme as UH's de referência.



**Figura 9 - Apresenta os cinco exutórios (pontos em cor branca) localizados com base na área de contribuição calculado pelo método de estimativa  $D_{\infty}$ , representado pela função Log10. (a) MDEHC com 20 metros de resolução espacial e (b) MDEHC com 7 metros de resolução espacial**

Destarte, com a localização de cada ponto de saída das respectivas UH's junto aos produtos direcionais  $D_8$  e  $D_\infty$ , foi possível estimar, individualmente, a área de contribuição a montante de cada exutoírios previamente selecionado. Vale lembrar que os produtos finais matriciais elaborados foram convertidos para o formato vetorial com o intuito de melhorar a representação cartográfica ao leitor. A figura 10, a título de exemplo, apresenta a estimativa da UH de Santa Maria conforme o procedimento metodológico apresentado.

### Resultados e discussões

O intuito dessa seção é apresentar a discussão referente a estimativa das 5 (cinco) UH's de interesse a partir dos modelos de estimativa de fluxo direcional e de área de contribuição ( $D_8$  e  $D_\infty$ ) utilizados, agregando o refinamento espacial do modelo altimétrico na discussão. A figura 11 apresenta os resultados alcançados na utilização dos 2 (dois) modelos em relação aos 2 (dois) cenários altimétricos elaborados.

Conforme pode ser observado, a partir dos resultado mostrados na figura 11 (a) e (b), que o método  $D_8$  executa o traçado das áreas de contribuição sem que haja a interposição de áreas adjacentes, atendendo *a priori* os objetivos dessa comparação.

Assim, foi possível entender o motivo pelo qual o método representou com a acurácia desejada os limites das UH's, uma vez que usa valores "absolutos" associados ao número de células a montante, cada qual com seu valor correspondente de área, eliminando assim a dispersão de fluxo no modelo. Esta é uma vantagem desse método com relação à extração de divisores d'água.

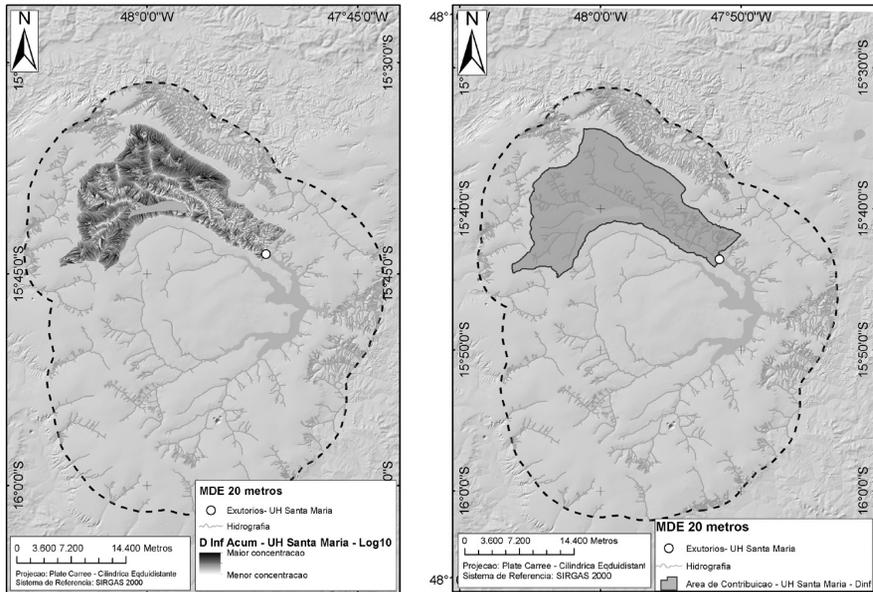
Com relação aos testes executados utilizando como base o método  $D_\infty$  (Figura 11 c e d) foram observados sobreposições entre áreas de contribuição adjacentes, o que pode inviabilizar o traçado acurado dos divisores d'água pretendidos. Essas sobreposições foram mais significativas entre os limites das UH de Santa Maria e Bananal, e entre as UH Riacho Fundo e UH Ribeirão do Gama.

O efeito constatado nesse resultado está associado ao próprio método de acumulação de fluxo de área a montante, inerente ao  $D_\infty$ , na estimativa de área de contribuição. Segundo Tarboton (1997), diferente do método de única direção ( $D_8$ ), o método inerente a múltiplas direções considerando os oito triângulos para a estimativa de infinitas possibilidades de fluxo direcional utiliza o próprio pixel de referência acrescido de todos os pixels a montante que tenham certa fração de contribuição, estimada no cálculo direcional, para a derivação da área de contribuição. Assim, é próprio desse método a introdução de dispersão de fluxo no modelo.

Essa constatação leva a conclusão que as sobreposições observadas entre áreas de contribuição adjacentes podem ser explicadas pela consideração de uma mesma célula (normalmente em área de borda) na estimativa de UH adjacentes, uma vez que o mesmo pode apresentar múltiplas contribuições introduzidas pela dispersão observada nesse método. Essa é uma desvantagem para o caso do objeto de estudo da presente pesquisa.

Segundo Tarboton (1997), a dispersão é inconsistente com a definição física de área a montante ( $A$ ) e área de contribuição ( $a=A/L$ ), sendo importante, então, a minimização do efeito de dispersão quando o interesse de pesquisa é a estimativa de  $a$ .

Com relação à hipótese levantada de possível acurácia no traçado dos divisores d'água a partir dos refinamentos espaciais do MDEHC, não foram constatados "ganhos" perceptíveis considerando os dois estudos de caso.



(a)

(b)

**Figura 10 - Exemplo do roteiro metodol3gico proposto para a extraç3o e estimativa individualizada da UH Santa Maria a partir do ponto de exutorios previamente determinado, bem como de sua convers3o para o formato vetorial. (a) Exemplo em aplicaç3o no MDEHC 20 metros. (b) Exemplo em aplicaç3o no MDEHC 7 metros**

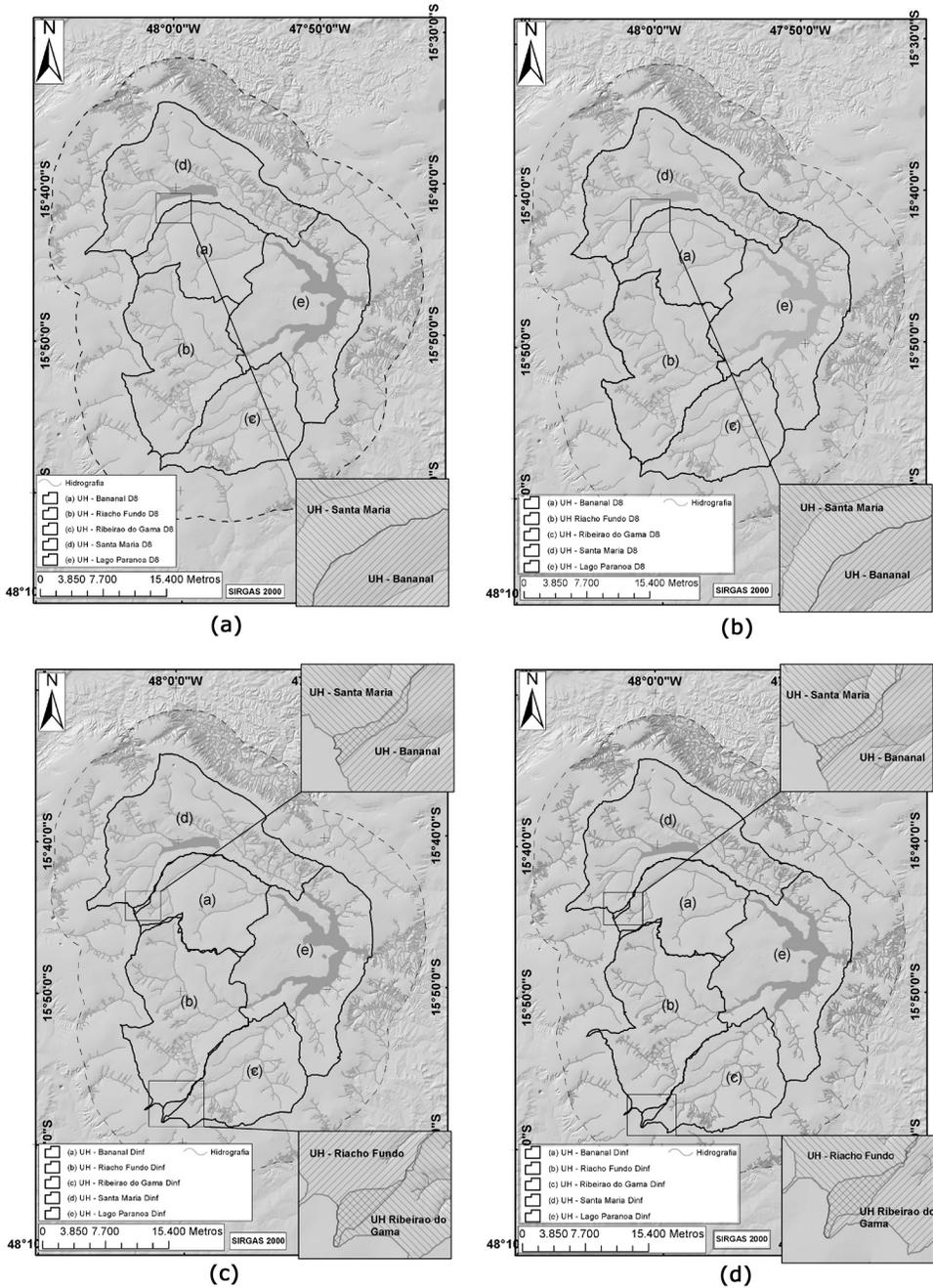


Figura 11 - Resultado obtido da estimativa das cinco UH's de interesse por meio do método D8 - (a) MDEHC 20 metros (b) MDEHC 7 metros, e do método D∞ - (c) MDEHC 20 metros (d) MDEHC 7 metros

Além disso, observou-se uma maior discrepância na estimativa das UH em relevos com menor declividade, conforme pode ser observado nos resultados alcançados considerando o contexto do MDEHC de 20 metros, e o de 7 metros de resolução espacial (Figura 12 e 13).

Como pode ser observado na figura 13, o refinamento espacial (20 metros e 7 metros) dos MDE elaborados não garante uma melhora na delimitação das UH adjacentes, referente à questão da sobreposição identificada. Nesse sentido, constata-se que esse efeito está vinculado a própria concepção e implementação do método de estimativa de fluxo superficial  $D_{\infty}$ .

Portanto, a partir dos resultados obtidos pela análise proposta na área-teste da bacia hidrográfica do Lago Paranoá, ficou constatado que para atender de forma mais acurada os propósitos desta presente pesquisa o método D8 apresentou melhores resultados se comparado ao método bidirecional  $D_{\infty}$ .

Vale ressaltar que mesmo com os resultados mencionados, o método  $D_{\infty}$  é um importante algoritmo que foi desenvolvido para outros tipos de objetos de pesquisa, que necessitem da dispersão do fluxo superficial em suas etapas metodológicas, tais como os estudos vinculados a determinação de áreas susceptíveis a movimentos de massa, dispersão de poluentes, entre outros.

## Conclusões

Visto a comparação realizada entre os dois métodos de estimativa de fluxo superficial e de área de contribuição voltada a finalidade de delimitação de bacias hidrográficas, especificamente as Unidades Hidrográficas – UH's, conclui-se que o método D8 é o mais adequado e que apresentou a melhor acurácia para a delimitação das Unidades Hidrográficas de interesse. A utilização do método  $D_{\infty}$  para essa finalidade ocasionou sobreposições de áreas adjacentes, relativas a células que teriam parte de suas contribuições de fluxo superficial ponderadas para ambas áreas de contribuição.

Essa constatação assenta-se na ausência de dispersão inerente ao método D8, diferente do bidirecional  $D_{\infty}$ . Tal método, desenvolvido por Tarboton (1997), considera a dispersão na estimativa de fluxo superficial e, no processo de delimitação das áreas de contribuição, o que ocasiona a sobreposição de áreas adjacentes, conforme constatado na seção anterior.

Assim, apesar de ser considerado um método mais robusto pela literatura para determinadas finalidades, o  $D_{\infty}$  não é o mais indicado para a delimitação de áreas de contribuição, observado os limites metodológicos adotados nesta análise. A acurácia das estimativas das UH com o uso do D8 está associada ao uso de valores "absolutos" no processamento do algoritmo, o que garante que cada célula detenha a integralidade de seu fluxo direcionado para uma determinada área de contribuição. Esta é uma vantagem desse método com relação à extração de divisores d'água.

O refinamento espacial do MDE no processo de comparação dos modelos de fluxo superficial considerados não apresentou vantagens comparativas entre os métodos, limitado a uma avaliação visual sobre os resultados. Assim a hipótese inicial que vincularia o refinamento espacial do modelo altimétrico a performance de ambos algoritmos foi descartada, o que fortaleceu a relação de causalidade dos resultados alcançados e suas limitações junto a própria concepção e implementação dos algoritmos analisados.

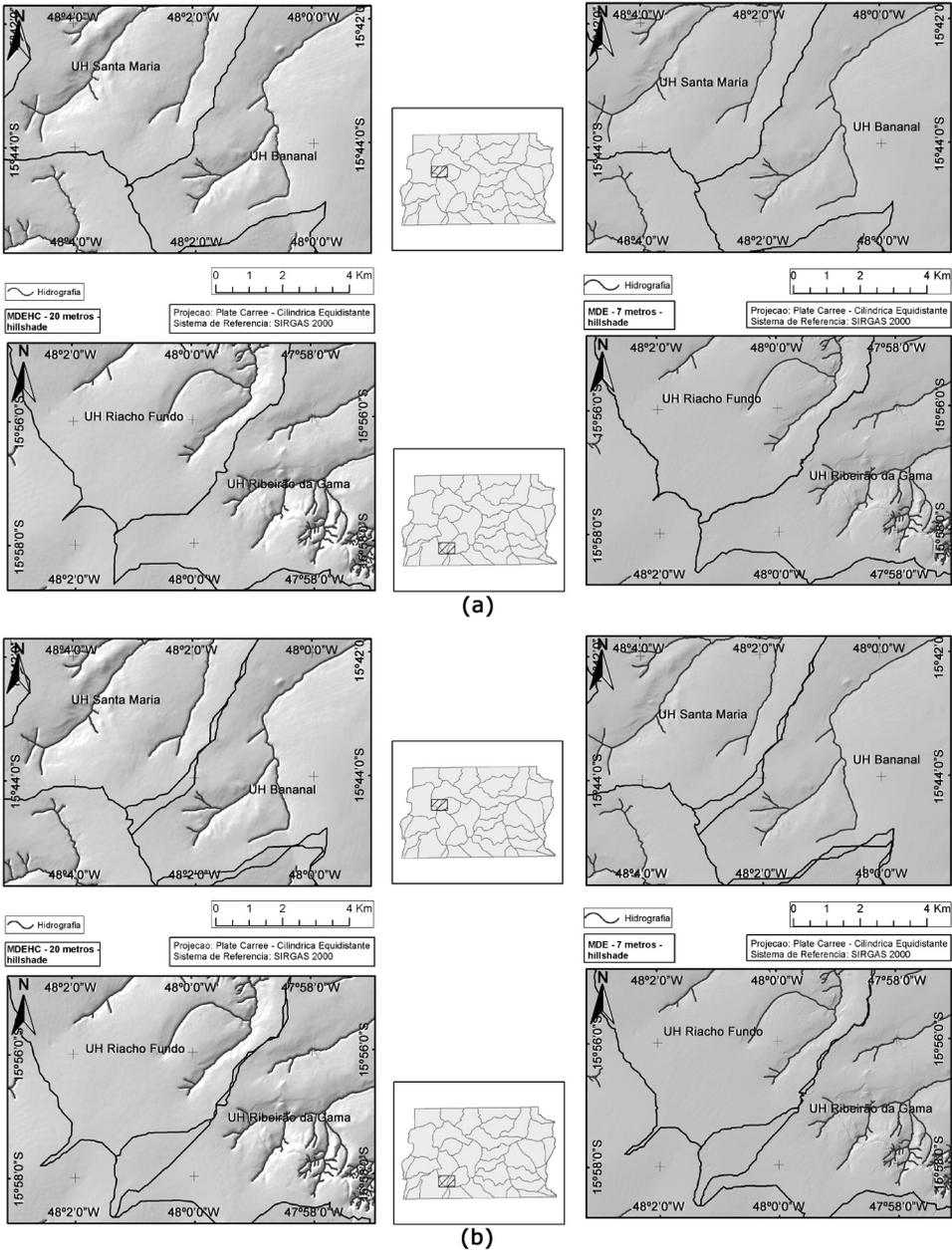
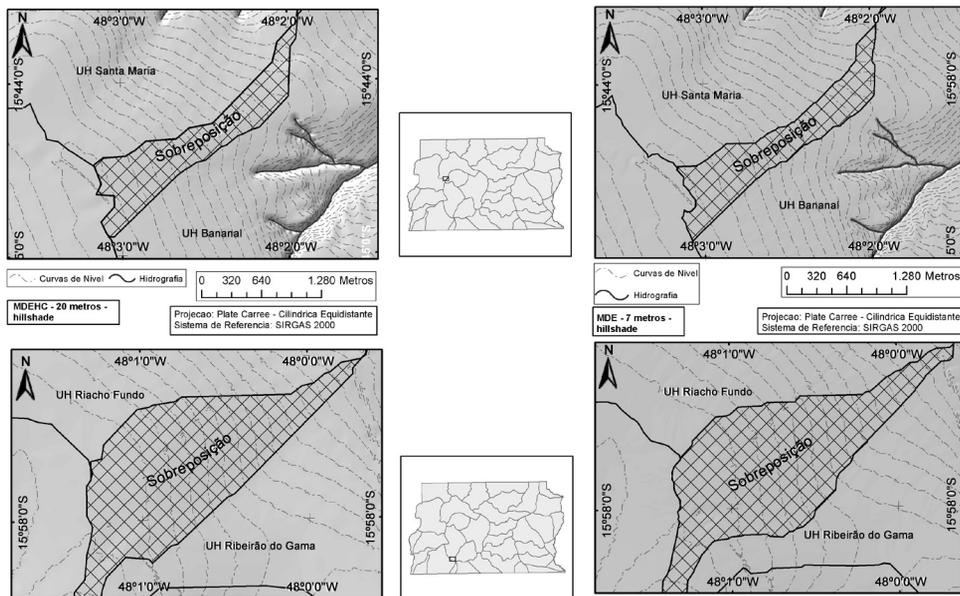


Figura 12 - (a) Comparação entre as UH's Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método D8, conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC. (b) Comparação entre as UH's Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método D<sub>∞</sub>, conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC



**Figura 13 – Áreas de sobreposição entre as UH's Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método  $D_{\infty}$ , conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC**

Futuros trabalhos e abordagens metodológicas são necessárias com vistas à refinar e comparar aos resultados alcançados. As comparações delineados no âmbito dessa pesquisa poderiam ser estendidas considerando outros métodos de estimativa de fluxo superficial, tais como os propostos por Quinn (1991), Lea (1992), Costa-Cabral (1994), entre outros.

A acurácia na delimitação de bacias hidrográficas influencia diretamente o aprimoramento da gestão de recursos hídricos no território brasileiro, tal como preconizado pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), tanto no aspecto técnico quanto político.

## REFERÊNCIAS

ACKERMANN, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: GREVE, C. W. (Ed.) **Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996. 135 – 149p.

BARBOSA, F. L. R. **Metodologia de delimitação das Unidades Hidrográficas no âmbito do Distrito Federal**. 2012. 137p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 04/09/2012.

- BARBOSA, F. L. R. **Desenvolvimento de metodologia para delimitação de ottobacias a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente na bacia hidrográfica do rio Verde Grande**. 2007. 54p. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 27/06/2007.
- BARROS, R. S. **Avaliação da altimetria do Modelo Digital de Elevação obtidos a partir de sensores orbitais**. 2006. 172p. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- BRASIL. Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. **Estabelece as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**.
- BRASIL. Governo do Distrito Federal – GDF. Decreto-distrital no 4008, de 26 de dezembro de 1977. **Institui o sistema cartográfico do Distrito Federal**.
- BRASIL. Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos**.
- BRASIL. MMA. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informes 2012. Ed. Especial**. Brasília: 2012. 215p. Available at: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/Conjuntura2012.pdf>
- CAMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHAES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Campinas: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996. 197p. Available at: <http://www.inf.puc-rio.br/~casanova/Publications/Books/1996-SIG.pdf>
- CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. 2002. 115f. Tese (Doutorado em ciência florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 03/04/2002.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgar Blucher, 1999. 256p.
- COSTA-CABRAL, M.; BURGESS, S. J. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resource Research**, v. 30, n. 6, p. 1681 – 1692, 1994.
- DJOKIC, D. **Comprehensive Terrain Preprocessing Using ArcHydro Tools**. Redlands: ESRI, 2008. 61p. Available at: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=41c96fadd2bf49ff8851002042c0495f>
- DRUCK, S. A Geoestatística e os Sistemas de Informações Geográficas. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 1 – 15, 2002.
- ESRI. **ArcInfo version 7.0.4 On- line documentation**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 1996.
- FERNANDES, M. C. Discussões conceituais e metodológicas do uso de geoprocessamento em análises geoecológicas. In: BICALHO, A. M. S. M.; GOMES, P. C. C. (Org.) **Questões metodológicas e novas temáticas na pesquisa geográfica**. Rio de Janeiro: Publit, 2009. p. 280 – 299.
- FREITAS, L. F. **Desenvolvimento de metodologia de identificação de áreas com alta probabilidade de ocorrência de voçorocas em ambientes urbanos**. 2005. 38p. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 24/06/2005.

GALVÃO, W.S. **Uso de sistemas de informação geográfica (SIG) na geração de modelos de favorabilidade a locação de estações fluviométricas e de unidades geoambientais homogêneas na bacia do rio São Francisco**. 2004. 303p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.

GUIMARÃES, R. F.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos *Shallow Stability*. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 6, n. 2, p. 133-150, 2003.

HUTCHINSON, M. F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: HUTCHINSON, M. F. **Proceedings of the Third Internacional Conference/ Workshop of integrating (GIS) and environmental modeling**. Santa Barbara: National Center of Geographic Information and Analysis, 1996. p. 6. Available at: [http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/hutchinson\\_michael\\_dem/local.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/hutchinson_michael_dem/local.html)

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 106, n. 3-4, p. 211 - 232, 1989.

KRIGE, D. G. A statistical approaches to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 52, p 119-139, 1951.

LANNA, A. E. L. **Gerenciamento de Bacia Hidrográfica - Aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e de Recursos Naturais Renováveis, 1995. 170p.

LEA, N. L. An aspect driven kinematic routing algorithm. In: PARSONS, A. J.; ABRAHAMS, A. D (Ed.). **Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics**, Londres: Chapman & Hall, 1992. p. 147-175.

LLAMAS, J. **Hidrologia geral: princípios y aplicaciones**. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 1993. 627p.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Digital elevation model issues in water resources modeling. **Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems**. ESRI Press, 2000.

MAUNE, D. F. **Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual**. Bethesda: ASP&RS, 2001. 540p.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, graphics and image processing**, San Diego, v. 28, n. 3, p. 323 - 244. 1984.

OLIVEIRA, S. N. **Metodologia para delimitação e análise multivariada de atributos morfométrico da bacia de drenagem usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido**. 2008. 74p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, 07/03/2008.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, A. J. **Hidrologia de superfície**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 179p.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5, p. 59 - 79. 1991.

SAKUDE, M. T. S. Modelagem de terrenos por superfícies triangulares de bezier. In: SIBGRAPI V, 1992. **Anais...** 1992, p. 213 – 222.

SANTOS, C. J. B.; SILVA, J. F. C.; MELLO, M. P. Avaliação da qualidade de Modelos Digitais de Terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados. In: CONGRESSO DE CARTOGRAFIA. **Anais...** Porto Alegre. Seção Pôster, Fotogrametria. [CD ROM], 2001.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH, 2001. p. 35 – 51.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope áreas in the grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309 – 319. 1997.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São Jose dos Campos: INPE, 2010. 74p. Available at: <http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35/doc/publicacao.pdf>

WALLIS, C.; WATSON, D.; TARBOTON, D.; WALLACE, R. Parallel Flow-Direction and Contributing Area Calculation for Hydrology Analysis in Digital Elevation Models. In: PDPTA'09 – THE 2009 INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING TECHNIQUES AND APPLICATIONS, **Proceedings...** Las Vegas, Nevada, USA, 2009. p. 13 – 16. Available at: [http://www.neng.usu.edu/cee/faculty/dtarb/Wallis\\_PDPTAPaper09.pdf](http://www.neng.usu.edu/cee/faculty/dtarb/Wallis_PDPTAPaper09.pdf)

Recebido em abril de 2014

Revisado em outubro de 2014

Aceito em novembro de 2014