



## A ANÁLISE DE FENÔMENOS HIDROLÓGICOS E ESCOAMENTOS SUPERFICIAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ATRAVÉS DE IMAGENS SRTM

Tayná Freitas Brandão<sup>1</sup>  
Rosângela Leal Santos<sup>2</sup>

**Resumo:** *Este artigo descreve as principais aplicações dos modelos digitais de elevação (DEM) na hidrologia, ao qual foi amplamente difundida após a inclusão de modelos hidrológicos aos sistemas de informações geográficas (SIG), bem como após a disponibilização gratuita dos dados altimétricos do SRTM. Apresenta-se, de forma geral, as principais funções existentes e seus respectivos produtos disponíveis, seus resultados e aplicações, buscando delinear tanto a rede de drenagem como a bacia hidrográfica e seu escoamento superficial, nos principais softwares no mercado, sejam eles proprietários ou gratuitos.*

**Palavras-chave:** DEM, Modelagem Hidrológica, SIG

### 1. Introdução

A bacia hidrográfica se configura atualmente como umas das principais unidades de gerenciamento territorial que dispomos nas atividades agrossilvipastoris, sendo modelada pelas condições geológicas e climáticas locais. Entretanto, em função do desenvolvimento da sociedade, cada vez mais, as bacias hidrográficas têm sofrido alterações na estrutura física dos canais, no aporte de sedimentos, na composição da biota, no regime hidráulico e no fluxo de matéria e energia. Tais alterações e o padrão espacial do uso e cobertura do solo têm importantes efeitos sobre a produção e transporte de sedimentos (Vanacker et al., 2005).

Os dados de sensoriamento remoto orbital atendem à necessidade de informação em diversas escalas, representando um meio viável de monitoramento da superfície terrestre através de satélites e seus sensores, e vem servindo de fonte de informações para estudos e levantamentos geológicos, agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, entre outros (Novo, 1988; Crósta, 1993). Os sensores medem a radiação refletida e/ou emitida pelos alvos, sendo passivos se necessitarem de uma fonte de luz externa (e.g., TM do Landsat) e ativos, caso possuam fonte própria de radiação, tais como radares e laser (Moreira, 2001).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) fornecem meios para o tratamento de dados georreferenciados de forma eficiente, com qualidade e rapidez, através de customizações e automatizações que permitem a padronização de resultados.

Nos últimos anos a aplicação e o desenvolvimento de ferramentas adequadas à gestão ambiental têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas, onde se destaca a aplicação das

---

<sup>1</sup> Estudante de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Feira de Santana –UEFS. Autora.

<sup>2</sup> Professora da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS. Orientadora



geotecnologias, que incluem os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) e o Sensoriamento Remoto e se encontram num estágio avançado de desenvolvimento, permitindo grande acessibilidade de recursos, a custos relativamente baixos Jacintho (2003).

Todas estas atuais modificações e ampliação da gama de produtos ofertados pelo sensoriamento remoto orbital, indicam um crescente potencial do uso destes dados para estudos geomorfológicos, onde, as informações sobre as formas de uso e cobertura do solo, juntamente com os dados topográficos, possibilitam o desenvolvimento de modelos hidrológicos mais acurados.

Os SIG's têm grande importância na gestão ambiental por facilitarem o gerenciamento de informações espaciais e permitirem a elaboração de relatórios que subsidiam as tomadas de decisões. O Sensoriamento Remoto, por sua vez, devido à rapidez e periodicidade na obtenção de dados primários sobre a superfície terrestre, constitui-se uma das formas mais eficazes de monitoramento ambiental em escalas locais e globais. Neste contexto, para representar a informação espacial e temporal de bacias hidrográficas de maneira rápida por meio de mapas de uso do solo, são utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, juntamente com um sistema de informação geográfica Jensen (2006); Tucci (2000).

Através da obtenção direta, ou estimada do valor de escoamento superficial de água sobre o solo, produzem-se informações importantes a respeito de infiltração de água no solo e da recarga de aquíferos subterrâneos. O escoamento superficial é um importante processo associado à erosão hídrica e ocorre em função da cobertura do solo, declividade do terreno e tipo do solo, intensidade e duração das chuvas basicamente. Ferreira et.al, (2007).

No Brasil, a grande maioria dos estudos hidrológicos, segue as informações topográficas existentes nas cartas planimétricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). No entanto, editadas em 1977, essas cartas não representam a paisagem atual. A recente coleta de dados topográficos por técnicas de sensoriamento remoto, como os dados SRTM ( Shuttle Radar Topography Mission), tem se mostrado como alternativa a falta de informações relativas ao relevo. Conforme Zeilhofer (2001) e Nobrega et. al (2004), o emprego destes dados como fonte de informação altimétrica pode suprir as necessidades decorrentes da ausência ou escassez de cartografia em muitas regiões do globo terrestre , por sua vez, causadas pela dificuldade de acesso ou pela carência de projetos de mapeamento sistemático. Estas duas situações se enquadram na realidade da cartografia nacional.

Assim o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso das imagens SRTM para a modelação de fenômenos hidrológicos com ênfase no estudo do escoamento superficial.

## **2. Área de estudo**

O município de Feira de Santana está localizado no Estado da Bahia na Região Econômica do Paraguaçu, situado cerca de 105 km a noroeste (NW) de Salvador, capital do estado baiano. O município se destaca por ser o maior entroncamento rodoviário do Norte-Nordeste com uma população em torno de 500 mil habitantes, possuindo uma extensão aproximada de 1350 km<sup>2</sup>. Geologicamente, é constituído por tabuleiros areno-argilosos, repousando concordantemente sobre o embasamento cristalino, formando pacotes sedimentares



que variam de 1.5 m a 15m de profundidade. As altitudes são modestas, em torno de 250m, com exceção dos relevos residuais que ocorrem preferencialmente ao norte e oeste do município, podendo estes alcançarem mais de 600m. A drenagem principal do município é constituída pelos rios Jacuípe, à esquerda, e o Pojuca e Subaé à direita. (Figura 1).

Para região de estudo, assim como para quase todo globo terrestre, estão disponíveis dados de modelo numéricos de terreno com resolução de 90 metros, provenientes do NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de distribuição gratuita.

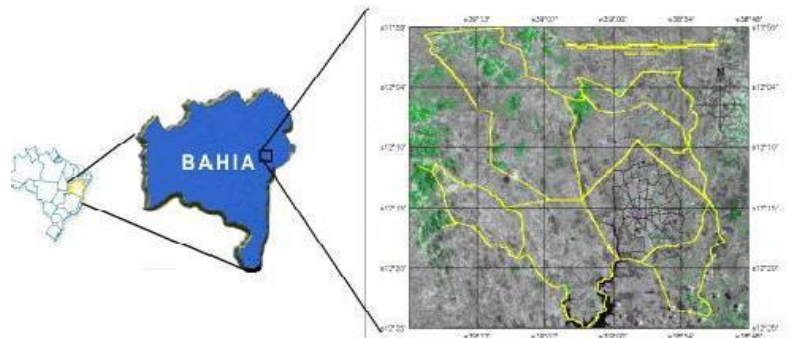


Figura 1: Município de Feira de Santana, no Estado da Bahia. Mapa do município com os Distritos (em amarelo) e destaque para a divisão da área urbana em bairros (preto). Informações sobrepostas a uma composição RBG 3-4-2 da imagem CCD do CBERS-2 de 06/03/2006.

### 3. Materiais e Métodos

A delimitação da bacia hidrográfica, das sub-bacias, das linhas de água, da rede hidrográfica, da classificação hierárquica de Strahler, e de todas as variáveis morfométricas foram efetuadas a partir Modelo de Elevação Digital (DEM), obtidos a partir de duas imagens SRTM que foram mosaicadas por georreferenciamento, e reamostradas por krigagem.

O SIG utilizado foi o MapWindows, que é um aplicativo gratuito, sendo um sistema de informação geográfica (SIG) extensível, pelo acoplamento de plug-ins que pode ser utilizado de várias formas. Também definido como um SIG “programável” que suporta a manipulação, análise e visualização de dados geospaciais e associação de atributos em diversos formatos padrões de SIG. Este sistema pode ser considerado tanto uma ferramenta de mapeamento e um sistema de modelagem, como um interface de programação de aplicações (API). No caso do MapWindows ele utiliza como aplicativo de modelagem hidrológica o TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models), o qual incorpora as ferramentas de análise do DEM e outras funções desenvolvidas por David Tarboton (1997). Este plug-in possui três menus:

**Análise básica da grade** (*Basic Grid Analysis*), que, como o nome diz, realiza as análises básicas da grade e que gera a entrada para todas as outras funções. Nesta etapa ela irá gerar a própria rede de drenagem, com o processamento do algoritmo D8.

**Análise de rede** (*Network Analysis*), que contém as funções necessárias para



delinear a rede de canais e lençóis de água, bem como sua estruturação e hierarquização.

**Grade especializada** (*Specialized Grid*) que apresenta as funções mais avançadas que podem ser chamadas quando necessário. Associada principalmente aos processos de acumulação de água.

Os dados topográficos, podem ser armazenados em formato digital através de três estruturas básicas:

- a) Modelos de elevação digital em formato de grade (os famosos DEM's – Digital Elevation Models ou MDE, Modelos Digitais de Elevação);
- b) Redes irregulares triangular (TIN's – Triangular irregular Networks); e
- c) Estruturas de armazenamento baseadas em contorno (isolinhas e/ou spiline).

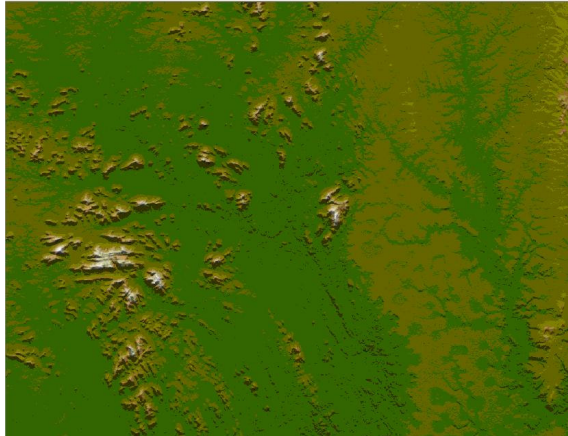
As grades consistem de uma estrutura matricial de dados com as elevações topográficas correspondente a cada pixel armazenada nos nós da matriz. No armazenamento em formato de TIN, tanto a localização (x, y) como a elevação são armazenadas em nós irregularmente espaçados. A estrutura de dados baseada em contornos armazenam suas estruturas como dados vetoriais, ao longo das linhas de contorno.

Na grande maioria dos softwares utilizados em modelagem hidrológica, para extração automática características morfométricas (Arc Hydro, SAGA, MapWindows, SPRING), todo o procedimento é baseado num algoritmo determinístico de 8 direções de fluxo (D8).

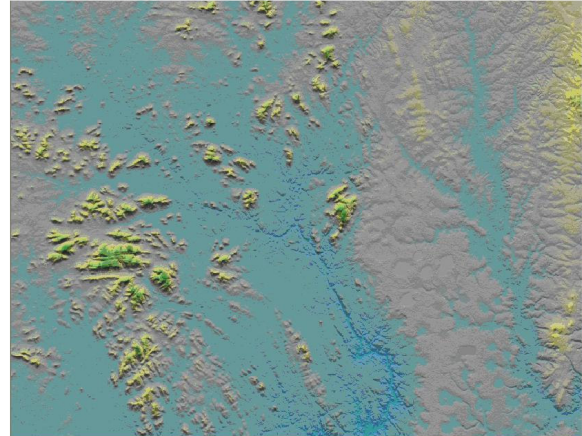
Além da extração da rede de drenagem, estes módulos também permitem gerar tabelas. As áreas de captação identificadas podem ser facilmente ligados a uma tabela com coluna de identificadores e podem ser exportados para outras aplicações. De qualquer modo, a rede de drenagem e as áreas de captação, em suas diferentes ordens de grandeza podem ser agregadas, segundo diferentes ordens da hierarquia da rede de drenagem. Também podem ser calculados uma série de índices compostos, utilizando fluxo acumulação de área e encosta ou rede de drenagem e mapas de direção de fluxo.

Para a realização deste estudo, utilizaram-se dados SRTM com resolução espacial de 92 metros (Figura 2).

Primeiramente foi retirado os possíveis *sinks* (Fill Sinks) dos dados SRTM. Estes consistem em áreas rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, que podem ser associadas à depressões. Estas depressões ou *sinks* são consideradas impedimentos ao escoamento, quando da aplicação de modelos chuva-vazão, modelos sedimentológicos e de poluentes de origem difusa sendo preenchidas levando em consideração as altitudes dos pixels vizinhos Mendes e Cirilo (2001).



(a)



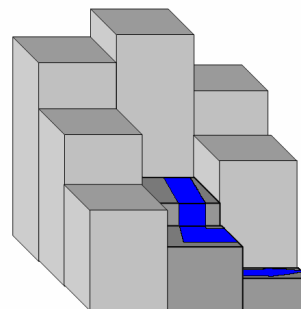
(b)

Figura 2 – Imagem SRTM abrangendo o Município de Feira de Santana (BA). (a) Imagem em composição falsa cor de hipsometria; (b) Imagem após a retirada dos sinks.

O próximo passo foi definir a direção de fluxo de água (*Flow Direction*). Para tanto, utiliza-se a regra da maior declividade, atribuindo o sentido do escoamento para a célula vizinha que apresente a maior diferença de elevação do terreno em relação à célula em questão dividida pela distância entre elas, seguida do tratamento de situações particulares Jenson e Domingue (1988). A direção de fluxo determina a direção de maior declividade de um pixel em relação a seus 8 pixels vizinhos (Figura 3). Tem a finalidade de montar uma grade digital onde o valor de cada pixel representa a direção de escoamento da água. Cada pixel recebe um valor que representa a direção para onde a água segue (Figura 03). Esta direção será aquela que levará a água para o pixel vizinho de menor valor de altitude Mendes e Cirilo (2001). Para este procedimento utilizou-se o algoritmo D8 (Fluxo de direção D8): este algoritmo assume que, para a direção do fluxo, cada célula se dirige para uma vizinha adjacente ou diagonal utilizando passos descendentes. A encosta é avaliada a medida em que o fluxo desce e é expressa como uma relação altura/distância, isto é, a tangente do ângulo. A direção do fluxo é considerado sem dado ou nula para qualquer célula adjacente da grade situada na borda do MDE, ou adjacente é uma célula sem valor. Em áreas planas, a direção do fluxo é determinado independente da altura da superfície indo em direção das superfícies mais baixas. O algoritmo de direção de fluxo D8 também pode ser aplicado sobre um MDE que não tenha seus *pits* preenchidos, posto que este se associarão a valores direcionais associados aos valores mais baixos da encosta.

22	25	19
17	10	14
12	8	4

(a)



(b)

Figura 3 – Direção de escoamento de um pixel, determinado pela declividade. (a) Matriz de valores; (b) Representação altimétrica



A partir deste processo, se consegue gerar toda uma série de produtos indiretos, alimentados apenas como os dados do MDE como entrada, que possibilitam caracterizar e extrair as variáveis morfométricas mais importantes para análise fluvial.

Quando o mapa da área de contribuição é visualizado utilizando um limiar escolhido, a rede de canais se forma a partir dessas células com área de contribuição maior que o limiar da área de contribuição. Cabe-se então decidir qual é o mais apropriado limiar ou a partir de que valor se estima a contribuição da encosta para esse limiar. Uma vez que o limiar tenha se estabelecido, a rede de canais pode ser definida (mapeada) com todas as células do *gride* com áreas de contribuição maior que o limiar.

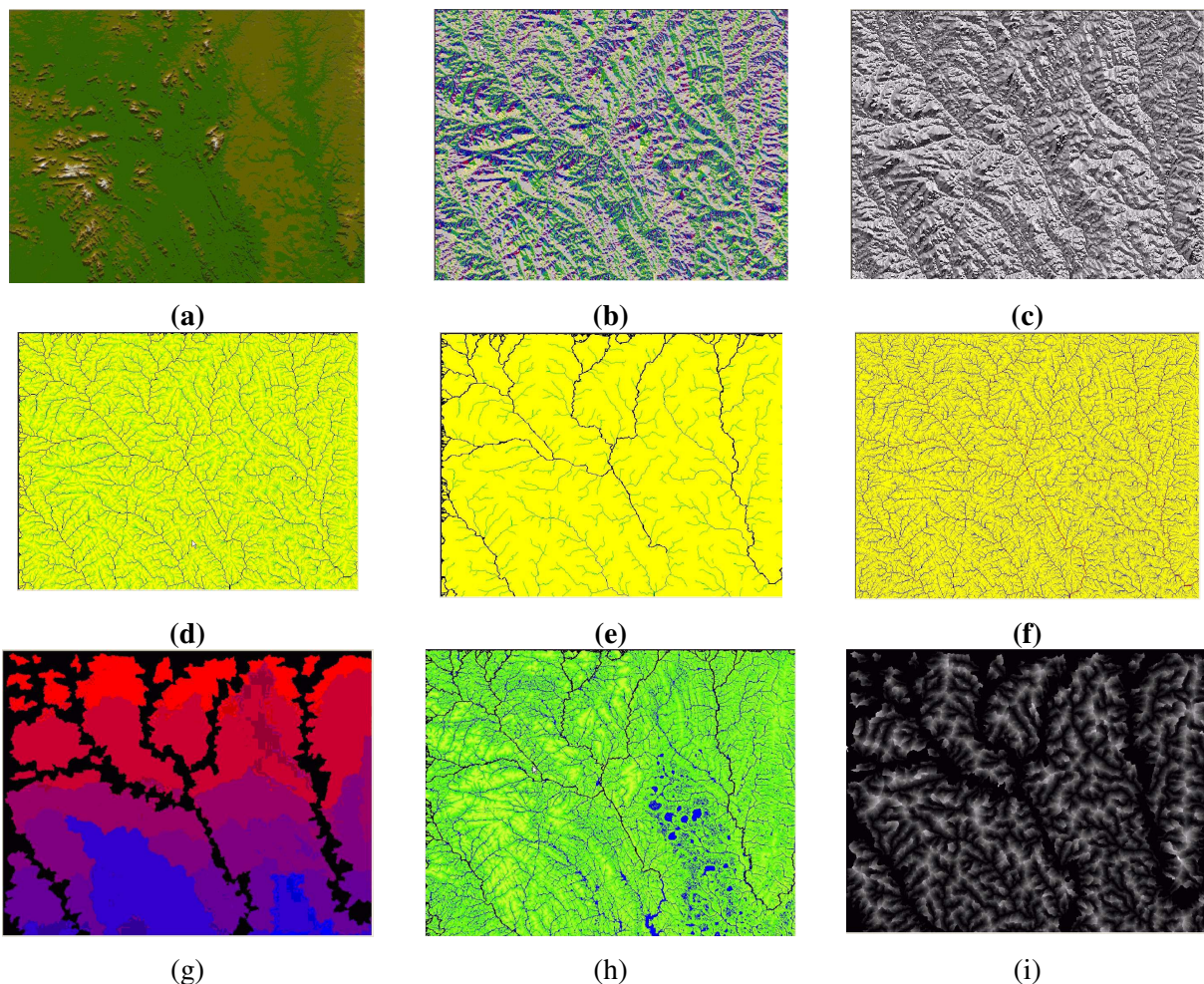


Figura 5 – Imagens resultantes de processamento do SRTM. (a) Imagem original, composta por falsa cor, simulando hipsometria; (b) Direção de fluxo do escoamento; (c) Direção do fluxo calculado pelo Dinf; (d) Área de contribuição calculado pelo algoritmo D8; (e) Área de captação específica dinf; (f) Ordenamento da rede segundo Strahler; (g) Bacias e sub-bacias hidrográficas; (h) Índice de umidade (Vertente/Área); (i) Distâncias entre canais fluviais.

#### 4. Resultados e Discussão

A partir da imagem SRTM os dados processados foram geradas 14 novas imagens raster, representando os resultados da ação do algoritmo D8 além de duas saídas vetoriais, representando a rede de drenagem em formato *shape* (Figura 5).



Estes arquivos no formato gride são especialmente usadas para representar fenômenos geográficos que variam no tempo e no espaço como os fenômenos hidrológicos.

As falsas depressões constituem um problema importante na geração de modelos de predição do escoamento, pois interrompem o escoamento superficial. Devem ser removidas, portanto, para se ter um MDE consistente sob o ponto de vista hidrológico.

Essas imperfeições são muito freqüentes nos MDE's e derivam-se de erros presentes nos dados de entrada ou introduzidos no processo de interpolação.

Os resultados apresentados nos mostrou uma tendência de quanto mais elementos existem no dado vetorial que impossibilitam a indeterminação (limites diferentes de bacias ou sub-bacias hidrográficas ou corpos d'água não devidamente representados) maior é o percentual de segmentos indeterminados. Por outro lado, a topografia plana do terreno também prejudicou a correta formação contínua da rede no seu formato final de exportação (vetorial). Este fato deve-se principalmente a natureza do método determinístico do algoritmo utilizado, quando aplicado ao relevo plano, onde o fluxo dos rios sofre infiltração nos solos bastante permeáveis e profundos formando uma rede de drenagem pouco marcada.

## 5. Conclusões

Utilizando os dados orbitais da SRTM na geração de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes, viabiliza-se a extração de variáveis físicas das bacias hidrográficas em SIG em menor intervalo de tempo auxiliando na tomada de decisões relativas à gestão ambiental. As técnicas de sensoriamento remoto, aliadas às técnicas de SIG se mostram eficientes para avaliações referentes a dados hidrológicos.

Conforme Valeriano (1999), as principais vantagens do uso do SRTM estão ligadas ao evidenciamento dos canais de drenagem e divisores de água cujos limites podem ser diretamente digitalizados, assim como apoiar o georreferenciamento de imagens de sensoriamento remoto. Porém, este dado apresenta como desvantagem o fato das feições serem estruturadas no formato raster e não vetorial o que dificulta a aplicação de recursos, como a manipulação de arcos e sobreposição de bases.

A aplicação de pacotes hidrológicos contidos nos SIG's baseados em DEM aqui descritos, apesar de todos os problemas apresentados no decorrer deste trabalho, vem favorecer a pesquisa hidrológica oferecendo novos recursos, aumentando a flexibilidade necessária para extrair uma rede completa topologicamente baseada em modelos hidrológicos com relevantes atributos associados. Com a utilização de produtos orbitais, como os fornecidos pelo SRTM, pode se formar uma rede realísticamente produzida. Futuramente, ações mais complexas podem ser adicionadas como a modificação de fluxo topológico e outros processos hidrológicos mais complexos. Também pode ser agregado outros métodos de hierarquização além do de Strahler (1957) como o das Ottobacias. Os dados espaciais e tabulares podem ser exportados em diferentes formatos, podendo assim, serem utilizados em outros aplicativos facilitando a parametrização de modelos hidrológicos.



## 6. Referências

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. ver. Campinas: UNICAMP, 1993. 164 p.

EBNER, H. e EDER, K., (1992) State of the Art in Digital Terrain Modelling. **In: European Conference and Exhibiton on GIS, EGIS 92**, pp 681-690.

FERREIRA, D. E. Estimativa do escoamento superficial na bacia do córrego João Pedro através de técnicas de geoprocessamento. **Anais I seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**, Taubaté, Brasil, 07-09 novembro de 2007, IPABHi, p. 163-169.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: earth resource pespective**. London: Princite-Hall, 2006. 544 p.

MENDES, C. A. B., CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

NOBREGA, R. A. A. ; QUINTANILHA, J. A.; BARROS, M. T. L. Modelagem digital do terreno como subsidio para a geração da altimetria e das ortofotos para o sistema de suporte a decisões da bacia do Cabuçu de Baixo em São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2004.

RENNÓ, Camilo Daleles. Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. **Tese de Doutorado do Curso da Pós-Graduação e Sensoriamento Remoto**, São José dos Campos: INPE, 2004.

RUBERT, O.; RIBEIRO, C.; CHAVES, M. (1999). “Um novo divisor de águas na geração de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes” **in XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte (MG).

SHAW, D.; MARTZ, L.; PIETRONIRO, A. (2005). “Flow routing in large-scale models using vector addition”. **Journal of Hydrology**. 307, pp. 38-47.

SIMÕES, Margareth Gonçalves. Modeladores digitais de terreno em sistemas de informação geográfica. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993, 167 pag.

STARHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. Trans. American Geophysical Union, 1957.

TARBOTON, D. G. ; AMES, D.P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, **in World Water and Environmental Resources Congress Anais**, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE, 2001.

TARBOTON, D. G., A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models, **Water Resources Research**, 33(2): 309-319, 1997..



TARBOTON, D. G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. **Hydrologic Processes**, 5(1): 81-100, 1991.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Physical Basis for Drainage Density, **Geomorphology**, 5(1/2): 59-76, 1992.

TONELLO, Kelly Cristina. Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. **Tese de Doutorado em Ciência Florestal**. Viçosa: UFV, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 943 p.

VANACKER, V.; Molina, A.; Govers, G.; Poesen, J.; Dercon, G.; Deckers, S. River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. **Geomorphology**, v. 72, n. 1-4, p. 340-353, 2005.

VALERIANO, M. M. **Estimativas de variáveis topográficas por geoprocessamento para a modelagem da perda de solos**. 172 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 1999.

ZEILHOFER, P. Modelação do relevo e obtenção de parâmetros fisiográficos na bacia do Rio Cuiabá. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, 2001.