

MARCELO DE ÁVILA CHAVES

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO HIDROLOGICAMENTE
CONSISTENTES PARA A BACIA AMAZÔNICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C512m Chaves, Marcelo de Ávila, 1962-
2002 Modelos digitais de elevação hidrologicamente consis-
tentes para a Bacia Amazônica / Marcelo de Ávila Chaves.
– Viçosa : UFV, 2002.
115 p. : il.

Orientador: Carlos Antonio A. S. Ribeiro
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa

1. Amazonas, Rio, Bacia – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente – Programa de computador.
 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Recursos hídricos
- I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.99

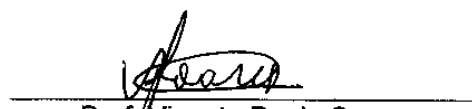
MARCELO DE ÁVILA CHAVES

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO HIDROLOGICAMENTE
CONSISTENTES PARA A BACIA AMAZÔNICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.


APROVADA: 3 de abril de 2002.


Prof. Demetrius David da Silva
(Conselheiro)


Prof. Vicente Paulo Soares
(Conselheiro)


Prof. Elpidio Inácio F. Filho


Dr. Renato Moreira Hadad


Prof. Carlos Antonio A. S. Ribeiro
(Orientador)

À minha esposa, Marina.
A os meus filhos Rodrigo e Elisa.
A os meus amigos e familiares,
que tiveram dias de convívio furtados e assim
mesmo estiveram ao meu lado ao longo desta
jornada.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realizar o Curso.

À Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, por viabilizarem a realização do meu Curso de Doutorado através do Programa de Capacitação de Recursos Humanos – PCRH.

Ao amigo e orientador, Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro, pela sua orientação, pela confiança, pela transmissão de conhecimentos e pelas motivações nos momentos de incerteza.

Aos co-orientadores, aos membros da banca examinadora, ao Dr. Paulo Martins do CETEC e ao Dr. Luís Fernando Soares de Assis, da FEAM, pelas contribuições apresentadas.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pela amizade.

À Ritinha, Secretária da Pós-Graduação do Curso de Engenharia Florestal, pelo apoio administrativo e pela sua competência profissional.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

O autor, natural de Cruzília-MG, formou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em 1984.

Iniciou sua carreira profissional no Departamento Fundiário da Fundação Rural Mineira – Ruralminas e do Instituto Nacional de Reforma Agrária – INCRA, atuando nas áreas de discriminatória de terras devolutas, vistoria e avaliação de imóveis rurais para desapropriação e em projetos de assentamento de trabalhadores rurais no âmbito do Programa Federal de Reforma Agrária.

Em 1989, iniciou o Curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, tendo apresentado sua dissertação em 1992, que trata do uso acoplado de modelos matemáticos com imagens de satélite para estimativa dos balanços regionais dos ciclos hidrológico e do carbono de ecossistemas florestais.

Em 1990 foi, contratado pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC para atuar na área de geoprocessamento, onde exerce atividades de pesquisa, desenvolvimento e aplicação das geotecnologias para o setor público e privado, com ênfase na área ambiental.

Em 1997, iniciou o Curso de Doutorado em Ciência Florestal da UFV concluindo a defesa da Tese em 2002. Nesse período passou a atuar também na área acadêmica como professor do curso de Engenharia Ambiental da FUMEC e do Curso de Especialização em Geoprocessamento oferecido anualmente pela UFMG.

CONTEÚDO

| | Página |
|--|---------------|
| RESUMO | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Objetivo | 3 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1. A representação digital do relevo..... | 6 |
| 2.1.1. Amostragem..... | 8 |
| 2.1.2. Modelagem | 9 |
| 2.1.2.1. Modelos de interpolação de distribuição regular (<i>raster</i>) | 10 |
| 2.1.2.2. Modelos de interpolação de distribuição irregular (TIN) | 12 |
| 2.1.2.3. Comparação entre os modelos de interpolação regular e irregular (<i>raster</i> x TIN) | 14 |
| 2.1.2.4. Transformações entre os diversos tipos de repre- sentação do relevo | 17 |
| 2.1.2.4.1. Transformações para geração das grades com estrutura regular (MDE <i>raster</i>) | 18 |

| | Página |
|---|---------------|
| 2.1.2.4.2. Transformações para geração das grades com estrutura irregular (MDE TIN) | 18 |
| 2.1.3. Produtos derivados dos modelos digitais de elevação, análises e aplicações | 23 |
| 2.2. Utilização dos modelos digitais de elevação (MDE) em estudos hidrológicos..... | 26 |
| 2.3. Métodos utilizados para extração de feições fisiográficas de interesse em estudos hidrológicos a partir de modelos digitais de elevação (DEM)..... | 34 |
| 2.3.1. Extração de feições fisiográficas a partir de modelos <i>raster</i> | 35 |
| 2.3.1.1. Identificação da rede de drenagem numérica..... | 35 |
| 2.3.1.1.1. Refinamentos dos processos de identificação da rede de drenagem numérica | 43 |
| 2.3.1.2. Identificação de bacias e sub-bacias hidrográficas.... | 49 |
| 2.3.1.3. Identificação de outras variáveis fisiográficas de interesse hidrológico..... | 55 |
| 2.3.2. Extração de feições fisiográficas a partir de modelos digitais de elevação no formato TIN | 60 |
| 2.4. Avaliação da exatidão e precisão das feições fisiográficas extraídas..... | 63 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 69 |
| 3.1. Localização da área de estudo | 69 |
| 3.2. Dados e materiais utilizados | 71 |
| 3.3. Abordagem metodológica proposta | 72 |
| 3.3.1. Sensoriamento remoto..... | 72 |
| 3.3.2. Sistema de informações geográficas | 73 |
| 3.3.2.1. Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem para uso do TOPOGRID | 73 |
| 3.3.2.2. Geração do modelo digital de elevação – MDE com o uso do TOPOGRID | 76 |
| 3.3.2.3. Pós-processamento para geração do modelo digital de elevação hidrológicamente consistente – MDEHC | 80 |
| 3.3.2.4. Validação da metodologia proposta e aplicabilidade do produto | 84 |

| | Página |
|--|---------------|
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 87 |
| 4.1. Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem | 87 |
| 4.2. Geração do modelo digital de elevação via TOPOGRID/ARCINFO | 92 |
| 4.3. Pós-processamento para geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente | 94 |
| 4.4. Validação metodológica | 100 |
| 4.4.1. Exatidão de representação da hidrografia mapeada | 100 |
| 4.4.2. Exatidão da delimitação de bacias hidrográficas | 101 |
| 4.5. Aplicabilidade do produto | 104 |
| 4.5.1. Delimitação automática de bacias hidrográficas de contribuição | 105 |
| 4.5.2. Visualização do trajeto de escoamento superficial de um ponto selecionado até a sua foz..... | 105 |
| 5. CONCLUSÕES | 108 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 110 |

LISTA DE QUADROS

| | Página |
|--|---------------|
| 1 Sugestão de tamanho de células com base na escala e no tipo de aplicação..... | 12 |
| 2 Estrutura de tabelas utilizada para armazenamento de coordenadas e topologia em um TIN..... | 15 |
| 3 Possibilidades de transformações entre as diversas formas de representação do relevo | 18 |
| 4 Relação de rotinas comerciais implementadas para extração de informações hidrológicas disponíveis nos principais sistemas de informações geográficas | 31 |
| 5 Parâmetros fisiográficos de interesse em estudos hidrológicos..... | 57 |
| 6 Estatística dos dados altimétricos de entrada e de saída do MDE..... | 92 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| 1 Criação e representação de isolinhas | 6 |
| 2 Parte de uma carta planialtimétrica – representação do relevo por pontos cotados e isolinhas | 7 |
| 3 Estrutura de dados regular (forma de pontos) (a) e estrutura irregular (triângulos) (b) | 10 |
| 4 Porção de uma superfície e a matriz regular (células quadradas) correspondente..... | 11 |
| 5 Grade irregular triangular sobreposta a uma imagem do relevo..... | 13 |
| 6 A estrutura de um TIN gerada pelo ARCINFO | 15 |
| 7 Ajuste de superfície de um mesmo triângulo, respectivamente pela interpolação linear (a) e quártica (b).... | 22 |
| 8 Imagens de MDE da região do bairro Ouro Preto, Belo Horizonte-MG | 25 |
| 9 Informações do relevo derivadas do MDE da Figura 8 com isolinhas superpostas: a) isolinhas espaçadas de 10 m, b) mapa de declividade (em azul menores valores e em amarelo/vermelho maiores declividades, c) mapa de orientação (exposição) e d) perfil topográfico do segmento sobreposto à imagem MDE fatiada | 27 |

| | Página |
|----|---|
| 10 | Representação básica dos modelos hidrológicos 28 |
| 11 | Representação espacial matricial dos compartimentos que compõem a realidade da paisagem..... 31 |
| 12 | As oito possíveis direções de escoamento, codificadas em num sistema de base 2, para cada uma das células do MDE 36 |
| 13 | Cálculo do caminho preferencial da água que cai numa célula (altitude 67 m) localizada na borda de um MDE hipotético. A direção de escoamento é dada no sentido da célula de maior declividade 37 |
| 14 | Processo de extração da drenagem numérica 38 |
| 15 | Arquivo <i>raster</i> de fluxo acumulado 39 |
| 16 | Identificação das células e da drenagem numérica com limiar de fluxo acumulado superior a 4 células (em vermelho) ou a 0 célula (Figura 5)..... 39 |
| 17 | Vista transversal de: a) uma depressão espúria de um MDE e b) depressão espúria preenchida 41 |
| 18 | Vista transversal de uma depressão natural (sumidouro) de um MDE (a) e o assinalamento de célula NODATA para representação computacional (b) 41 |
| 19 | Remoção de pontos de depressão. (a) Caracterização de uma depressão; (b) elevação de valores de altitude subestimados 43 |
| 20 | Segmentos de drenagem numérica extraídos: a) de um MDE e b), de um MDEHC, com seus respectivos perfis 44 |
| 21 | Aprofundamento do relevo ao longo da drenagem (c) vista em plano (a) e em perspectiva no MDE original (b) 47 |
| 22 | O processo de <i>stream burning</i> de drenagem em MDEs de diferentes escalas..... 48 |
| 23 | Representação matricial de um trecho da drenagem numérica: (a) representação de seus tributários (números), pontos de deságüe dos tributários (roxo); e (b) ponto de deságüe da bacia hidrográfica na última célula vermelha do canto inferior direito 50 |

| | Página |
|----|---|
| 24 | Delimitação de bacia hidrográfica: (a) identificação automática do ponto de interesse com o cursor; e (b) Delimitação da bacia hidrográfica a montante e a jusante do ponto de interesse 50 |
| 25 | Valores de diferença de fluxos de um MDEHC hipotético (c), calculado a partir dos arquivos de direção de escoamento (a) e de fluxo acumulado (b)..... 52 |
| 26 | Base de dados com os pontos de partida (limiar de 10 células) 53 |
| 27 | Sub-bacias hidrográficas delimitadas com cores diferenciadas 53 |
| 28 | Modelo digital de elevação TIN de uma bacia hidrográfica com o realce das áreas planas em vermelho 62 |
| 29 | Rede de drenagem e delimitação automática da bacia hidrográfica de Armand pelos algoritmos (a) Filburn.aml; (b) expocurv.aml; (c) Agree.aml, e (d) Triburn.aml. Delimitação da bacia em preto itálico, distorções dos limites em vermelho e inconsistência de limites em verde 65 |
| 30 | Localização da área de estudo..... 70 |
| 31 | Geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente – Etapas 1 e 2 75 |
| 32 | Geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) – Etapa 3..... 81 |
| 33 | Processo matemático de criação do TALVEGUE 82 |
| 34 | Drenagem original de parte da base hidrográfica constante da carta topográfica do IBGE – rio Preto do Igapó-Açu, em azul (hidro_orig) e a simplificação da sua representação, em vermelho, orientada no sentido da foz (hidro_orient) 88 |
| 35 | Sentido de orientação da drenagem digital do IBGE, em azul (hidro_orig), e reorientação dos arcos para a foz, em vermelho (hidro_orient)..... 88 |
| 36 | Validação visual do sentido de escoamento da drenagem, em vermelho (hidro_oriclip) e representação dos exutórios das redes de drenagem indicadas por pontos azuis (foz_pt) . 89 |

| | Página |
|----|--|
| 37 | Ajuste visual de segmentos da curva de nível, em vermelho (cn_ajust), à rede de drenagem simplificada e conectada (hidro_oriclip). Segmento central da isolinha, indicado pela seta, ainda não ajustado (cn_orig) 90 |
| 38 | Carta imagem de satélite..... 91 |
| 39 | Histograma e percentual das classes altimétricas do MDE.... 92 |
| 40 | Modelo Digital de Elevação gerado pelo TOPOGRID 93 |
| 41 | Transformação do formato de representação da drenagem – vetorial, em vermelho (hidro_orient), para raster, em azul (riosthin_clip) 94 |
| 42 | Altimetria da rede de drenagem matricial – zrios (metros) 95 |
| 43 | Parte do MDE aprofundado ao longo da drenagem (Mde_afund) 96 |
| 44 | Depressões espúrias eliminadas do MDE , em vermelho (<i>Sink</i>) sobrepostas à rede hidrográfica vetorial simplificada e orientada, em preto (hidro_orient) 96 |
| 45 | Região de um trecho do modelo onde se construiu o TALVEGUE (área preta)..... 97 |
| 46 | Representação esquemática do TALVEGUE (b), posterior ao processo de <i>stream burning</i> (a)..... 98 |
| 47 | Direção de escoamento de um trecho do MDEHC - modelo D8 (Dir_final)..... 99 |
| 48 | Margem ao longo da hidrografia na região refinada pelo TALVEGUE próximo à borda do MDEHC (área branca) 99 |
| 49 | Detalhe da direção de escoamento de cada uma das células de um trecho da margem apresentada na Figura 48 (Dir_hidro). O valor 255, em vermelho na borda direita do modelo, indica a foz..... 100 |
| 50 | Comparação da distribuição espacial das drenagens vetoriais. Em vermelho, a drenagem extraída a partir do MDE-TOPOGRID (Drenmde_030); em preto, a drenagem extraída a partir do MDEHC corrigido; e em azul, a drenagem vetorial da base do IBGE (hidro_orient) 101 |

| | Página |
|--|---------------|
| 51 Delimitação automática de bacias hidrográficas a partir do MDE gerado pelo TOPOGRID (subbaciato) com a hidrografia do IBGE sobreposta | 102 |
| 52 Delimitação automática de bacias hidrográficas a partir do MDEHC gerado pela metodologia proposta | 102 |
| 53 Detalhe da inconsistência hidrológica do Modelo Digital de Elevação, mostrado pela seta amarela | 103 |
| 54 Detalhe da MDE gerado pelo TOPOGRID com Tol1 de 7,5 .. | 104 |
| 55 Delimitação de uma pequena bacia de contribuição, em preto | 106 |
| 56 Delimitação de uma bacia de contribuição maior, em cinza, a partir de um ponto de interesse (ponto vermelho)..... | 106 |
| 57 Delineamento de um escoamento superficial em área de planície aluvial | 107 |

RESUMO

CHAVES, Marcelo de Ávila, D.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2002. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Conselheiros: Demetrius David da Silva e Vicente Paulo Soares.

O advento da tecnologia dos sistemas de informações geográficas e a crescente disponibilidade de modelos digitais de elevação de alta resolução fizeram com que a extração automática de características morfométricas de bacias hidrográficas se tornasse uma alternativa viável aos métodos tradicionais de obtenção manual dessas informações a partir de mapas topográficos. Isso é particularmente importante quando se lida com bacias hidrográficas do porte da bacia Amazônica e para a criação de bases de dados digitais. Neste trabalho apresentam-se os principais problemas relacionados ao desenvolvimento de uma metodologia para geração de modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para regiões de planície. A integração da hidrografia mapeada com o modelo digital do terreno, assegurando a exatidão da direção de escoamento em áreas com escassez de dados de altimetria, representa, sem dúvida, um dos maiores desafios à geração desses modelos. As soluções desenvolvidas nesse estudo representam um avanço considerável na qualidade e fidedignidade dos processos para delineamento automático de bacias hidrográficas e na derivação de suas características fisiográficas.

ABSTRACT

CHAVES, Marcelo de Ávila, D.S., Universidade Federal de Viçosa, April 2002. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica.** Adviser: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Committee members: Demetrius David da Silva and Vicente Paulo Soares.

With the advent of Geographic Information Systems (GIS) technology and the increasing availability of high-resolution digital elevation models (DEM), the automated derivation of basin physiographic characteristics has become a viable alternative to traditional, manual extraction of these parameters from topographic maps. This is particularly important when dealing with watersheds of the size of the Amazon basin. This dissertation presents the main issues related to the development of a gridded topographic database for the entire Legal Amazon region, which encompasses an area of 4.8 million square kilometers. The integration of the vector hydrograph layer into the DEM and assuring the correctness of the flow direction on flat areas in the DEM posed a major challenge for this task. The solutions adopted in this study play a crucial role for improving the accuracy of digital watershed delineation and to derive the corresponding physiographic parameters.

1. INTRODUÇÃO

O processo histórico de ocupação humana da superfície terrestre, quase sempre realizado de forma intensa e desordenada, tem afetado significativamente a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos, em especial os superficiais. Desta forma a água, que é um dos elementos vitais para a sobrevivência de todas as espécies, passou, no último século, a ser considerada um bem vulnerável, limitado e, portanto, dotado de valor econômico. Por isso, a bacia hidrográfica passou a se adotar como a unidade espacial de análise na maioria dos estudos hidrológicos e ambientais e em atividades de planejamento. Nessas áreas também se observa, como suporte aos sistemas cognitivos, a crescente utilização das tecnologias de sensoriamento remoto orbital e de sistemas de informações geográficas para extração, tratamento, análise e modelagem de dados e informações espaciais, dentre os quais se destaca o relevo.

O relevo atua como importante agente regulador da distribuição do fluxo de água e energia dentro das bacias hidrográficas e sua representação no universo digital é feita por meio dos modelos digitais de elevação – MDE - tanto no formato matricial (*raster*) quanto no formato TIN (*Triangulated Irregular Network*), sendo este último mais utilizado por algumas de suas peculiaridades técnicas, porém menos recomendado por questões operacionais.

Nas últimas duas décadas diversos algoritmos têm sido implementados em módulos específicos dos sistemas de informações geográficas com a finalidade de automatizar a extração de características morfométricas da superfície terrestre, a partir dos modelos digitais de elevação, dentre as quais se destaca o delineamento de bacias hidrográficas e da respectiva rede de drenagem. As vantagens da automação em relação aos procedimentos manuais são a maior eficiência e confiabilidade dos processos, a reprodutibilidade dos resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais.

A eficiência da extração dessas informações e de outras, derivadas a partir destas, medida em termos de precisão e de exatidão, está diretamente relacionada com a qualidade do modelo digital de elevação e do algoritmo utilizado. O modelo digital deve representar o relevo de forma fidedigna e assegurar a convergência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem mapeada, garantindo assim a sua consistência hidrológica.

Tais representações são conhecidas na literatura como modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes – MDEHC – e são a base para quaisquer estudos de natureza hidrológica, como os necessários para execução dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Esses instrumentos, discriminados na Lei nº 9.433, de 8/1/1997, são os planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas, o enquadramento dos corpos d'água em classes, segundo os usos preponderantes da água, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, a cobrança pelo uso de recursos hídricos e o sistema nacional de informações sobre recursos hídricos.

Dentre os algoritmos disponíveis comercialmente no mercado para a geração do MDEHC a partir da estrutura *raster*, destaca-se o TOPOGRID, implementado no módulo ARC do *software* ARC/INFO¹. Entretanto, algumas limitações para utilização desse programa têm sido detectadas, especialmente no que diz respeito ao correto delineamento da rede de drenagem em regiões planas. Para solucionar esse tipo de problema

¹ *Software* de Sistema de Informações Geográficas desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute, Inc. – ESRI.

diversas metodologias, não disponíveis nos *softwares* comerciais, têm sido propostas, incorporando técnicas de refinamento de superfícies e de *stream burning*.

No Brasil, a geração de MDEHC e o uso operacional de tais modelos ainda são incipientes, à exceção da experiência conduzida pela Universidade Federal de Viçosa - UFV no âmbito do Projeto SIF/SIVAM². Tal fato pode ser decorrente de diversos fatores, dentre os quais se destacam dois.

O primeiro é o elevado tempo para conversão e preparação dos dados digitais de drenagem e altimetria necessários à alimentação dos programas e o segundo e principal fator é a inconsistência dos resultados produzidos pelas metodologias de geração do MDEHC, disponíveis nos *softwares* comerciais, em especial para algumas regiões do Brasil onde os dados altimétricos são escassos e de baixa qualidade, como é o caso da Região Amazônica.

1.1. Objetivo

Este estudo foi realizado com o objetivo de propor e avaliar um novo método de pré e pós-processamento para geração de modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes em regiões planas e com escassez de dados altimétricos.

² Sociedade de Investigações Florestais – SIF - Sistema de Vigilância da Amazônia – SIVAM.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O relevo, sob o ponto de vista da topografia, refere-se ao conjunto das diferenças de altitude de pontos da superfície terrestre (Aurélio, 1986). Para outras áreas das geociências o termo é descritivo e passível de explicação e interpretação (Guerra, 1975). Assim, essa terminologia também se refere às formas da superfície. Independentemente do enfoque que se dê ao termo, o seu estudo é de interesse em diversos ramos da ciência, como a pedologia, a climatologia, a engenharia, a hidrologia, a ecologia e a geomorfologia.

As modificações das formas do relevo ao longo do tempo resultam da ação conjunta de forças internas, por meio das atividades tectônicas e de forças externas, mediante processos morfoclimáticos. Em geral, na análise do relevo atual as forças internas são colocadas em segundo plano, uma vez que seus efeitos são sentidos apenas em uma escala de tempo geológico. O tipo de relevo e os processos a ele inerentes estão associados a aspectos geológicos, climáticos, pedológicos, hidrológicos, biológicos, topográficos e de uso do solo.

O relevo é, desde os primórdios da humanidade, um fator determinante do processo de ocupação humana da terra. Sabe-se também que ele atua como um importante agente regulador da distribuição do fluxo de água e energia dentro de ecossistemas (Martz e Garbrecht, 2000).

A água proveniente dos escoamentos superficial e subterrâneo é o principal agente modelador externo do relevo, especialmente no domínio das

encostas, através dos processos erosivos naturais ou decorrentes de ações antrópicas (Guerra e Cunha, 1995). Por essa razão, encontram-se muitos topos e relativamente poucas depressões na maioria das paisagens, resultando em um padrão peculiar de drenagens interconectadas (Esri, 1996).

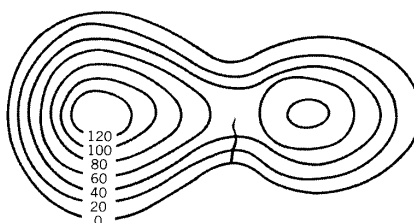
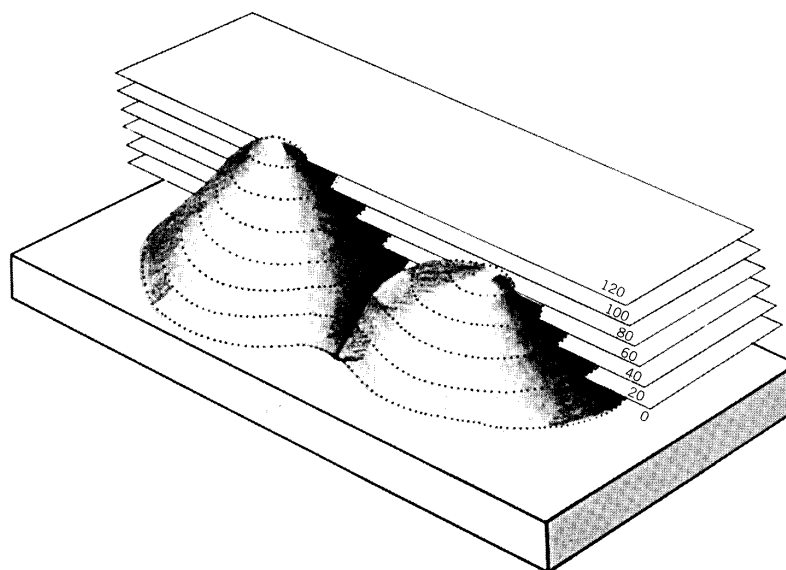
Os principais atributos do relevo são a altitude, a declividade, o comprimento, a forma e a orientação de topos, encostas e vales. Esses atributos influenciam sobremaneira os padrões do escoamento da água sobre a superfície, que, por sua vez, pode alterá-los através de processos erosivos, configurando-se assim um processo de retroalimentação.

O relevo de qualquer porção da superfície da Terra, para fins topográficos, é considerado uma feição tridimensional. Para cada valor de altitude (Z) de um determinado ponto associa-se uma dada localização no espaço bi-dimensional (X e Y). A transição entre os valores de altitude entre pontos adjacentes, em geral, é feita de forma contínua. Quebras abruptas na continuidade da superfície, proporcionadas por grandes variações nos valores de altitude, existem, mas são consideradas mais como exceções do que como regra.

Existem diversas técnicas de representação do relevo. Elas visam tanto registrar e permitir a visualização da forma da superfície quanto fornecer dados numéricos para solução de problemas de engenharia e estudos ambientais (Pinto, 1994). Todas se baseiam, na sua origem, em pontos amostrais de altitude coletados de forma regular ou irregular sobre a superfície terrestre, uma vez que, por ser uma feição contínua, torna-se impossível a amostragem de todos os seus pontos.

A representação por pontos cotados baseia-se na localização de pontos amostrais e de seus respectivos valores de altitude em um espaço bi-dimensional. Esta técnica não transmite uma perfeita noção do comportamento do relevo através da simples análise desses pontos.

Outra maneira tradicional de representação e visualização do relevo é através de curvas de nível ou isolinhas, que são o lugar geométrico de pontos de mesma altitude. Define-se cada curva pela cota do plano que a originou em relação ao plano de referência, conforme ilustrado na Figura 1.



Fonte: Chrisman (1997).

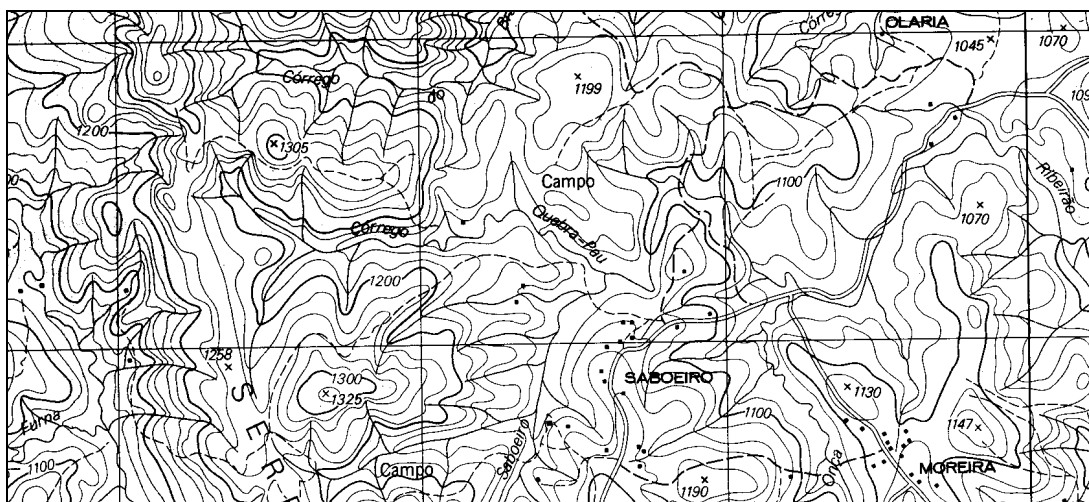
Figura 1 - Criação e representação de isolinhas.

Por definição, duas curvas de nível não se cruzam (Pinto, 1994). Embora essa forma de representação seja mais eficiente que a anterior, ela apresenta a desvantagem de indicar valores altimétricos da superfície somente ao longo da isolinha e das variações entre elas não são representadas. Portanto, torna-se necessário o uso de algum processo de interpolação para a estimativa dos valores das cotas entre isolinhas.

2.1. A representação digital do relevo

As técnicas tradicionais de representação do relevo por meio de pontos cotados e curvas de nível, extraídas através do processo de restituição analógica ou digital de fotografias aéreas, são, em conjunto, muito

utilizadas pelas instituições públicas e privadas responsáveis pela elaboração de mapas topográficos. A Figura 2 mostra parte de uma carta planialtimétrica.



Fonte: IBGE, Folha Itabirito, SF.23-X-A-III-3.

Figura 2 – Parte de uma carta planialtimétrica – representação do relevo por pontos cotados e isolinhas.

No Brasil, a maior parte dos dados altimétricos do mapeamento sistemático nacional ainda encontra-se disponível somente no formato analógico (em papel a partir da impressão de fotolitos). Esse formato impede a visualização, a análise numérica e a modelagem dos dados num ambiente computacional. Para isto é necessário, em um primeiro momento, a transformação desses dados para o formato digital e, posteriormente, a geração de um modelo digital de elevação (MDE³).

³ O termo modelo digital de elevação (MDE) origina-se da tradução da expressão da língua inglesa *digital elevation model (DEM)*. Nos Estados Unidos é utilizado no sentido específico de definir o formato de dados digitais de elevação (*raster*) produzidos pelo *United States Geological Survey (USGS)*. Outro formato de dados em uso naquele país é o *DMA (Defence Mapping Agency)*. No Brasil o termo é utilizado em duplo sentido. Em determinadas situações designa o formato *raster* e, em outras, qualquer representação digital de uma variável contínua de uma superfície (altitude) num espaço bidimensional, como, por exemplo, a representação no formato *TIN*. A expressão *digital terrain model (DTM)*, usualmente traduzida como modelo digital do terreno, é mais utilizada para representação digital de outras variáveis que também variam de forma contínua na superfície, como temperatura, pressão, nível de poluição, dentre outras (Burrough, 1986). Neste texto, o termo MDE estará sempre sendo utilizado num sentido mais amplo.

Os processos de transformação e edição de dados para o formato digital são abordados exhaustivamente na maioria dos livros e manuais de *softwares* de sistema de informações geográficas, como Burrough, (1986), Star e Estes (1990), Aronoff (1986) e Esri (1996).

O MDE pode ser considerado como qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço. Modelar digitalmente uma superfície significa representá-la por meio de um método ou modelo matemático a partir de dados de altitude.

No processo de geração dos modelos digitais de elevação podem-se, segundo Felgueiras (1998), distinguir três fases:

1. A aquisição dos dados para confecção do modelo (a amostragem).
2. A escolha do modelo matemático a ser utilizado para representação do relevo (a modelagem).
3. A elaboração dos produtos finais (as aplicações).

2.1.1. Amostragem

A amostragem de dados é a aquisição de um conjunto de amostras representativo da variação da altitude no espaço bidimensional. Esse conjunto de dados não deve ser insuficiente, o que caracterizaria uma subamostragem, nem em excesso, o que caracterizaria uma superamostragem que não significa necessariamente uma amostragem representativa.

A amostragem representativa considera a quantidade e a qualidade, esta expressa em termos do correto posicionamento das amostras em relação ao comportamento do fenômeno a ser modelado (relevo). O cuidado na escolha das amostras está diretamente relacionado com a exatidão da representação do relevo. O volume de dados a ser tratado em um ambiente computacional também deve ser considerado, tanto sob o ponto de vista de tempo de processamento quanto da capacidade do *hardware* e do *software*.

As fontes mais comuns de amostras de altitude são arquivos digitais dos mapas topográficos que contêm isolinhas e pontos de máxima e mínima ou levantamentos de campo, realizados com o auxílio de sistemas de posicionamento global (GPS), ou ainda dados extraídos diretamente de produtos de sensoriamento remoto. As amostras são classificadas, quanto à

sua posição relativa nos eixos X e Y, em regulares e irregulares (Pinto, 1994). O conjunto mais representativo da variação da altitude é, na grande maioria dos casos, irregularmente distribuído.

2.1.2. Modelagem

O tipo de modelo a ser utilizado é função do método de amostragem adotado na fase de aquisição dos dados. O modelo de superfície ideal deve representar a superfície com elevado grau de exatidão, minimizar a necessidade de armazenamento de dados, maximizar a eficiência de manipulação dos dados e ser apropriado para análises da superfície (Esri, 1996).

Os modelos digitais de elevação podem ser divididos em dois grandes grupos, de acordo com o modelo empregado na representação da superfície, a saber:

Modelos de aproximação (globais), que utilizam funções matemáticas analíticas, como polinômios, séries de Fourier, funções Spline, dentre outras. Essas funções definem uma superfície contínua para representar o relevo a partir de todos os pontos amostrais de altitude.

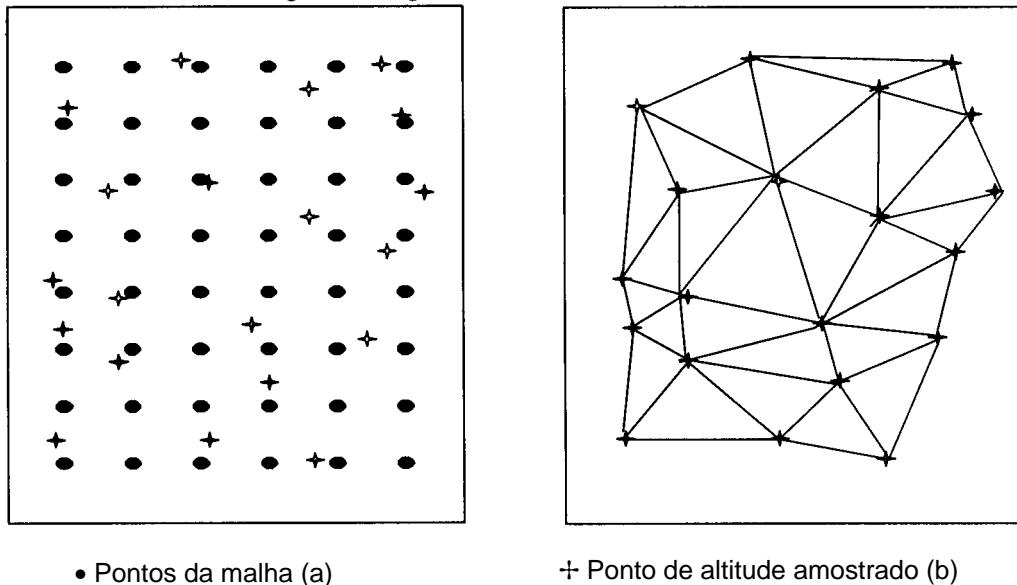
Modelos de interpolação (locais), que utilizam funções cujos coeficientes são definidos por parte do conjunto de pontos amostrais de altitude selecionados dentro de uma região de interesse. Essa seleção é feita com base em critério de distância ou quantidade de amostras vizinhas.

A partir desses modelos podem ser extraídos diversos tipos de informações qualitativas (visualização do relevo a partir de projeções planares) e quantitativas da superfície, como cálculo de declividade e da orientação de encostas.

Segundo Felgueiras (1998), o processo de modelagem envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para os elementos dessas estruturas.

A criação da estrutura de dados nos modelos de interpolação pode ser de forma regular (pontos ou células), gerada a partir da interpolação dos dados amostrais, ou irregular, utilizando, neste caso, os próprios dados de altitude. A distribuição regular, na forma de células, pode apresentar

diferentes formatos e tamanhos de malha, em geral retangulares ou quadradas, enquanto a distribuição irregular pode ser representada por meio de malhas formadas por triângulos diferentes através do processo conhecido como triangulação (Figura 3).



Fonte: Felgueiras (1998).

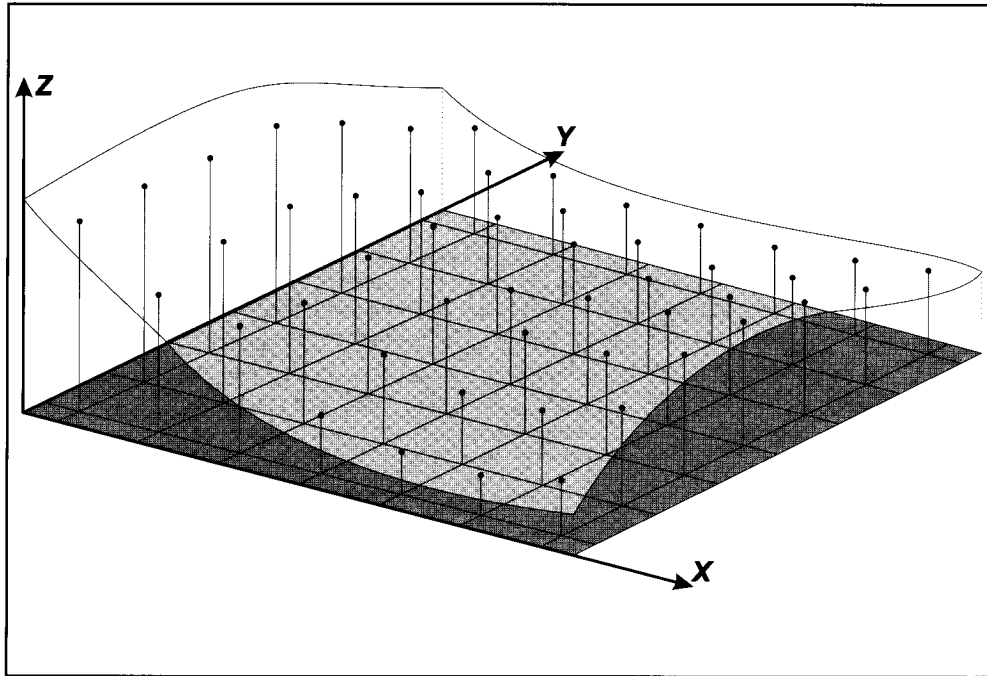
Figura 3 – Estrutura de dados regular (forma de pontos) (a) e estrutura irregular (triângulos) (b).

Os modelos de interpolação predominam sobre os de aproximação nos ambientes de sistemas de informações geográficas e dentre esses predominam os de distribuição regular (Sakude, 1992; Namikawa, 1995, Martz e Garbrecht, 2000).

2.1.2.1. Modelos de interpolação de distribuição regular (*raster*)

A estrutura dos dados dos modelos digitais de elevação, gerados a partir dos modelos regulares de interpolação, é denominada de *lattice*, quando na forma de pontos (Figura 3a), e *grid*, *raster* ou grade regular, quando na forma de células. Essa última estrutura consiste de uma matriz de células quadradas em que cada um de seus elementos apresenta o seu

valor médio de altitude armazenado em um arranjo espacial bidimensional, conforme ilustrado na Figura 4.



Fonte: Namikawa (1995), citado por Câmara e Medeiros (1998).

Figura 4 – Porção de uma superfície e a matriz regular (células quadradas) correspondente.

Para geração da estrutura *raster*, os pontos da matriz que não possuem valores de altitude precisam ser estimados a partir das amostras de entrada (pontos cotados e, ou, isolinhas). Para isto, utiliza-se alguma regra ou método de interpolação, que serão apresentados e discutidos no item 2.1.2.4.

A localização de cada uma dessas células dentro do MDE *raster* está implícita na localização de sua linha e coluna dentro da matriz, uma vez que se conhece o tamanho das células e as suas coordenadas externas. O espaçamento da grade regular da malha, ou seja, o tamanho da célula ou a distância entre dois pontos amostrais distintos, determina sua resolução em x e y .

A exatidão de representação de uma superfície, através da estrutura *raster*, está diretamente relacionada com a resolução, com a forma de

armazenamento do dado (inteiro ou ponto flutuante), com o processo de amostragem (quantidade e qualidade) e com o interpolador utilizado (Esri, 1996).

A resolução, de idealmente, deve ser menor ou igual à menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. A geração de uma grade muito densa demandará maior tempo para sua criação. Por outro lado, um espaçamento maior poderá gerar perda de informação. Assim, na escolha da resolução da malha deve haver o compromisso entre o objetivo da aplicação, a precisão dos dados e o tempo de sua geração. Uma recomendação genérica do tamanho das células para o uso de modelos digitais de elevação em estudos hidrológicos, formulada pelo USGS, para diferentes escalas de mapas e tipos de aplicação, é apresentada no Quadro 1.

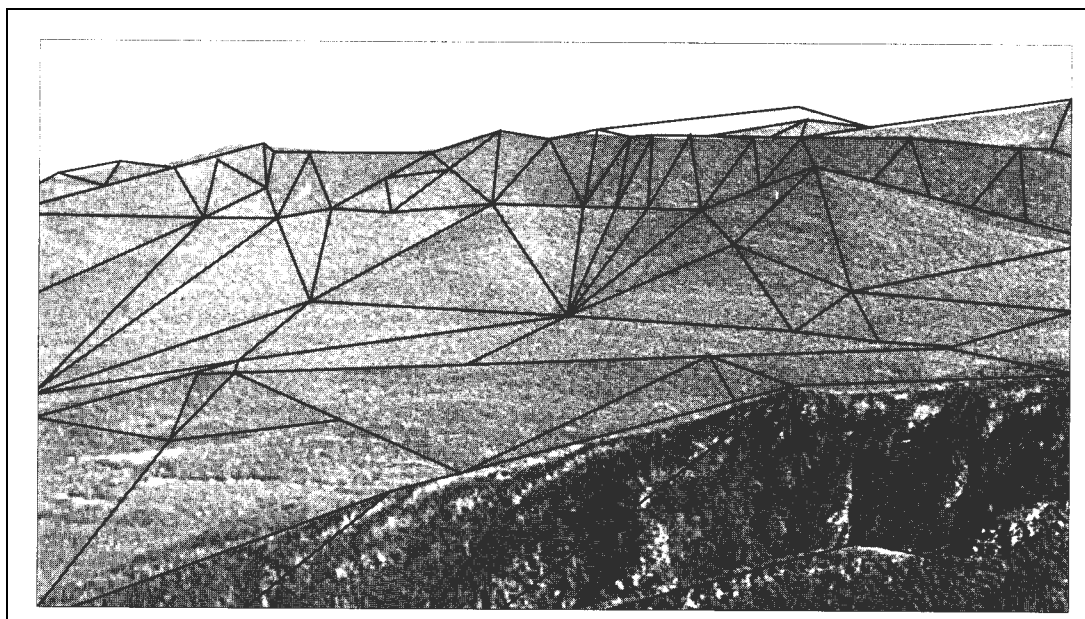
Quadro 1 – Sugestão de tamanho de células com base na escala e no tipo de aplicação

| Tamanho da Célula | Escala do Mapa/Fonte | Aplicação |
|-------------------|---|---|
| 30 m | 1:24.000 | Estudos de bacias hidrográficas urbanas |
| 100 m | 1:250.000 | Estudos de bacias hidrográficas rurais |
| 500 m | MDE reamostrado a partir dos MDE de 100 m | Estudos de bacias hidrográficas regionais |
| 1.000 m | MDE gerado a partir de fontes diversas | MDE da terra (GTOPO30) |

Fonte: Ribeiro (2000).

2.1.2.2. Modelos de interpolação de distribuição irregular (TIN)

A rede irregular triangular ou TIN (*Triangular Irregular Network*) é um modelo que aproxima a superfície através de poliedros de faces triangulares. É um modelo topológico de dados vetoriais, no qual os pontos das coordenadas tridimensionais X e Y (localização geográfica) e Z (elevação) são ligados por linhas, formando triângulos de facetas interconectadas, não sobrepostas e de tamanho irregular (Figura 5).



Fonte: Chrisman (1997).

Figura 5 - Rede irregular triangular sobreposta a uma imagem do relevo.

A triangulação é uma estrutura de dados bastante apropriada para modelagem do relevo, pois os vértices da rede triangular devem ser preferencialmente os pontos de altitude fornecidos, excluindo-se portanto pontos fornecidos por interpolação. Não pode haver o cruzamento de linhas durante a união de dois desses pontos, o que criaria um vértice fictício (Pinto, 1994). Os seus vértices, em geral, não apresentam valores de altitude iguais, o que faz com que cada triângulo apresente um determinado declive, dado pelo ângulo de inclinação da face do triângulo, e uma determinada orientação (exposição), dada pela normal a essa face.

Com um mesmo conjunto de pontos cotados é possível gerar diferentes triangulações. Desta forma, diferentes critérios foram propostos para construir uma triangulação apropriada para interpolações numéricas. O ideal nesse processo é que os triângulos formados sejam tão equiângulos quanto possível, de forma a evitar triângulos longos e finos. Isso equivale a dizer que os triângulos devem ser o mais equiláteros possíveis, evitando-se ângulos muito agudos. Essas condições são escolhidas para garantir a redução nos erros de interpolação, e não porque resultam necessariamente na melhor triangulação (Pinto, 1994).

Alguns algoritmos buscam maximizar o menor ângulo (triangulação de Delaunay) ou minimizar o tamanho das arestas através da árvore geradora mínima (*Minimum Spanning Tree*). Em geral, nos sistemas de informações geográficas – SIG – que possuem módulos para geração de modelos digitais de elevação, os algoritmos para geração da grade baseiam-se na triangulação de Delaunay, com restrição de região (Bourke, 1989; Câmara e Medeiros, 1998). Essa triangulação é tão equiangular quanto possível, sendo considerada como padrão para descrição de superfícies.

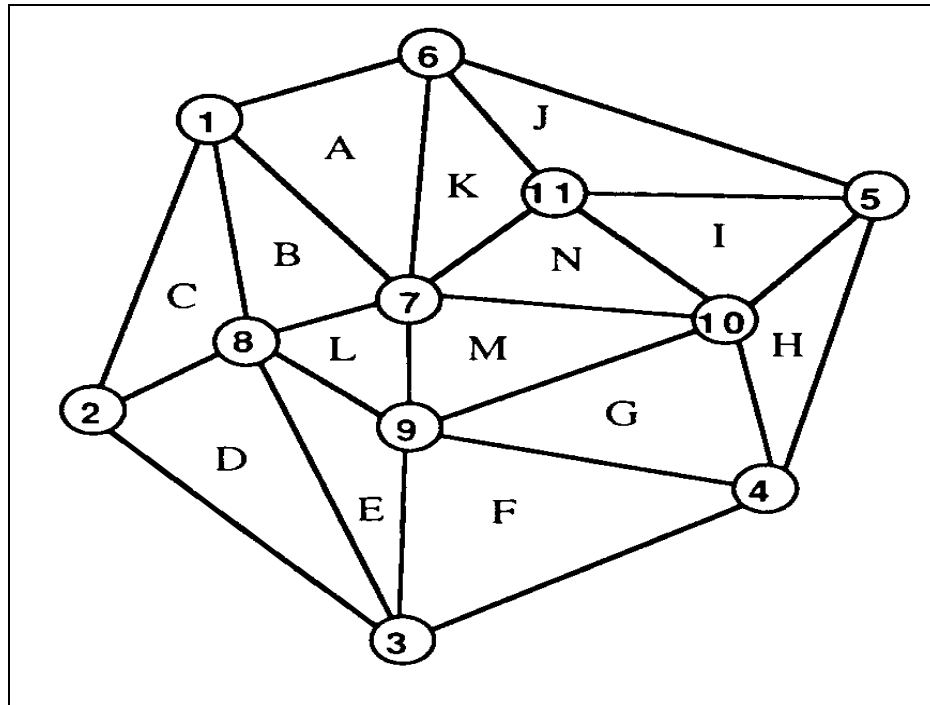
Os métodos para geração de rede triangular irregular (TIN) podem incorporar ou não linhas de quebra. As linhas de quebra modelam as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades da superfície, representadas por feições lineares de relevo (cristas), e a drenagem (vales). Essas linhas podem ser incorporadas à triangulação, constituindo-se em arestas dos triângulos. O modelo gerado com linhas de quebra possibilita a representação mais fiel do relevo, uma vez que não suaviza a superfície ao longo de feições como vales e cristas.

Segundo Aronoff (1986), a estrutura do TIN é armazenada em uma estrutura topológica onde cada triângulo ou face é identificado por uma letra (A, B, C, ..., M e N), que por sua vez é definida por três nós, identificados por números (1, 2, ..., 10 e 11), conforme ilustrado na Figura 6.

Os dados de coordenadas e altitude de cada ponto (X, Y e Z) e a topologia do TIN são armazenados em um conjunto de tabelas, conforme apresentado no Quadro 2. A tabela de nós lista cada triângulo e os nós que o definem. O quadro de bordas lista os três triângulos adjacentes a cada uma das três faces. A tabela de coordenadas armazena os valores de coordenadas e de altitude dos nós. Opcionalmente, pode-se ainda armazenar nessa estrutura topológica atributos de cada face do triângulo, como declividade e orientação.

2.1.2.3. Comparação entre os modelos de interpolação regular e irregular (*Raster* x TIN)

Em termos de armazenamento de dados, a representação por pontos cotados é a forma mais eficiente, pois o volume armazenado pode ser



Fonte: Aronoff (1986).

Figura 6 – A estrutura de um TIN gerada pelo ARCINFO.

Quadro 2 – Estrutura de tabelas utilizada para armazenamento de coordenadas e topologia em um TIN

| Coordenadas | | | Nós | | Bordas (Faces) | |
|-------------|------------------------|----------|-----------|-----------|----------------|-----------------------|
| Nó | Localização Geográfica | Elevação | Triângulo | Nó | Triângulo | Triângulos Adjacentes |
| 1 | X1, y1 | Z1 | A | 1, 6, 7 | A | B, K |
| 2 | X2, y2 | Z2 | B | 1, 7, 8 | B | A, C, L |
| 3 | X3, y3 | Z3 | C | 1, 2, 8 | C | B, D |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 11 | X11, y11 | Z11 | N | 7, 10, 11 | N | I, K, M |

Fonte: Adaptada de ARONOFF (1986).

reduzido incorporando um conjunto mínimo de dados para representação do relevo. As superfícies planas ou com declividade constantes podem ser eficientemente representadas com poucos pontos. As grandes desvantagens desse método são a dificuldade para visualizar a superfície e a necessidade de um processamento prévio para se efetuar a representação ou análise numérica do relevo (Chou, 1996).

As vantagens da representação por isolinhas são a eficiência de armazenamento dos dados e a efetiva maneira de apresentar a distribuição da variável altitude (Z). As principais desvantagens são a dificuldade de processar análises numéricas nesse formato em um ambiente SIG, quando comparado com o formato *raster* (Chou, 1996), e a maior dificuldade de interpolação entre isolinhas pelos algoritmos existentes (Chrisman, 1997).

As vantagens do uso das malhas regulares são a facilidade de codificação e o referenciamento das células da matriz, o que simplifica sua implantação em um ambiente computacional. Além disto, os cálculos numéricos são facilitados, pois o acesso é feito diretamente na base de dados, eliminando o seu pré-processamento (Chou, 1996). Têm-se ainda a facilidade de conversão (Câmara e Medeiros, 1998), a possibilidade de cruzamento com dados de satélite (também em formato matricial/*raster*), a melhor compreensão da representação do relevo pelo usuário e a adequação do formato ao processo de modelagem.

Como desvantagens citam-se a redundância de dados em áreas de superfície uniformes, que pode criar problemas no armazenamento; a dificuldade de adaptação desse modelo para representar relevos complexos, sem que seja necessária mudança no tamanho da malha; e a execução de cálculos fora dos eixos X e Y, que requer uma abordagem trigonométrica (Burrough, 1986).

Comparativamente à grade regular, a triangulação irregular apresenta a vantagem de não armazenar dados redundantes, uma vez que os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto de amostras. Assim, a malha triangular é mais fina em regiões de relevo acidentado e mais espaçada em regiões de relevo plano. Conseqüentemente, as áreas com grandes variações no relevo irão requerer maior densidade de pontos, enquanto áreas mais uniformes podem ser representadas com poucos dados de

altitude. O método apresenta ainda a vantagem de não utilizar interpolações de dados e poder incorporar restrições como linhas de crista e drenagens. As desvantagens são que os procedimentos para obtenção de informações derivadas tendem a ser mais complexos e demorados do que os provenientes da grade regular. Além disto, o TIN pode ser gerado somente dentro da área dos limites dos pontos (*convex hull*) (Chou, 1996).

Câmara e Medeiros (1998) destacam que a rede triangular é mais utilizada para aplicações quantitativas, enquanto a grade regular é mais utilizada para análises multiníveis. Ainda segundo os autores, no formato *raster* as relações topológicas entre as células da malha regular são explícitas, enquanto na rede irregular torna-se necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos. Por outro lado, Aronoff (1993) destaca a vantagem de a topologia na rede irregular permitir a realização de análises espaciais, como a contigüidade e conectividade, sem a necessidade de utilizar dados de coordenadas. Com isto haveria redução no tempo e maior eficiência de processamento.

2.1.2.4. Transformações entre os diversos tipos de representação do relevo

O conceito de transformação envolve a mudança de um sistema de representação para outro. Se a informação pode ser representada de N formas, o total de possibilidades de transformações será de N^2 .

No Quadro 3, a primeira linha e a primeira coluna ilustram as possibilidades de representação, enquanto as células da matriz 4 x 4 informam os tipos de procedimentos que convertem de uma forma para outra.

Os sistemas de informações geográficas disponíveis no mercado diferenciam-se quanto à disponibilidade de algoritmos de transformações, à eficiência computacional da implementação desses algoritmos, bem como aos tipos de interpoladores, que, por sua vez, são especificados de acordo com os tipos de dados de entrada e os objetivos da aplicação.

Quadro 3 – Possibilidades de transformações entre as diversas formas de representação do relevo

| Entrada/Saída | Pontos | Isolinhas | <i>Raster</i> | TIN |
|--|---------------|---------------------------------------|----------------------|---|
| Pontos com valor em Z | Interpolação | Interpolação e reconstituição (Trace) | Interpolação | Triangulação |
| Isolinha | Interpolação | Interpolação e reconstituição (Trace) | Interpolação | Triangulação |
| Grade com estrutura regular MDE (Pontos/ <i>Raster</i>) | Interpolação | Interpolação e reconstituição (Trace) | Reamostragem | Triangulação |
| Rede irregular triangular (MDE/TIN) | Extração | <i>Tracing</i> | Extração | Triangulação (simplificação /refinamento) |

Fonte: Chrisman (1997).

Devido ao grande número de transformações existentes, que variam de acordo com os dados de entrada e de saída, será realizada, no tópico seguinte, a apresentação mais detalhada apenas daquelas relacionadas com a saída para os formatos de representação *raster* e TIN a partir de pontos cotados e isolinhas (que constituem fontes primárias de dados). Informações sobre as demais transformações podem ser obtidas em Burrough (1986), Chrisman (1997) e Câmara e Medeiros (1998).

2.1.2.4.1. Transformações para geração das grades com estrutura regular (MDE *raster*)

A grade regular (MDE *raster*) pode ser gerada, conforme apresentado no Quadro 3, a partir de amostras (pontos e isolinhas) de outra grade regular ou irregular (TIN). Os métodos de interpolação, reamostragem e extração variam de acordo com o módulo específico do sistema de informações utilizado. Em seguida, será apresentada a fundamentação teórica de alguns desses métodos implementados nos aplicativos dos sistemas de informações.

Interpolação é o procedimento de prognóstico de valores não conhecidos de um atributo contínuo, no caso a altitude, utilizando valores conhecidos de pontos vizinhos (Aronoff, 1986). Parte desse processo envolve o conhecimento de relações de vizinhança e outra parte envolve a pressuposição de comportamento da superfície entre os pontos de valores conhecidos. A ponderação entre essas partes pode variar.

Alguns métodos impõem um **modelo global**, ou seja, faz-se o uso de todo o conjunto de amostras para interpolar cada ponto da grade. Na maioria dos casos o conjunto de amostras é muito grande e heterogêneo, o que torna difícil definir uma função polinomial capaz de representar satisfatoriamente todas as variações espaciais da altitude. O método é inadequado, nesses casos, em função do tempo de processamento computacional e da exatidão do modelo. Duas abordagens são utilizadas, o ajustamento da tendência de comportamento de superfície (*polynomial trend surface*) e a krigagem (*kriging*) (ESRI, 1986; Chou, 1996; Câmara e Medeiros, 1998).

A maioria dos métodos utilizados trabalha com **modelos de interpolação local** para estimativa da cota de cada elemento da grade a partir de dados próximos. Uma vantagem óbvia dessa abordagem é que a estimativa baseia-se na informação de vizinhança, refletindo de forma mais precisa variações nas adjacências imediatas. A desvantagem é a necessidade de se ter o conhecimento de uma “vizinhança válida” em termos de quantos e quais pontos devem ser utilizados (Chou, 1996).

Os modelos de interpolação local são implementados em três etapas. A primeira consiste na definição do número de pontos a ser utilizado para a estimativa. Para isso é necessário o conhecimento da disponibilidade de dados e do comportamento do relevo da área de estudo. Em geral, os interpoladores disponíveis nos sistemas de informações geográficas utilizam cerca de 6 a 8 pontos.

Uma vez definido o número de pontos, a próxima etapa é definir o critério de seleção entre os dados existentes. Os métodos mais utilizados são o do vizinho mais próximo, pesquisa por quadrante, pesquisa por octógono e pesquisa por raio de busca. O primeiro critério é o mais utilizado e requer uma dada medida de distância.

A terceira etapa envolve a escolha do método para a estimativa do valor de altitude (Z), para um determinado ponto, a partir do número de amostras selecionadas. O método mais usual é a média simples, que é geralmente utilizado quando se requer maior rapidez na geração da grade com o objetivo de avaliar erros grosseiros na digitalização. Outro método é a média ponderada, em que pontos mais próximos têm um peso maior do que pontos mais distantes na estimativa do valor de Z . As funções de distância assinalam pesos de diferentes maneiras, tais como a distância euclidiana e o inverso do quadrado da distância. Existem vários outros métodos, mas a adequação de uso de um método específico para uma determinada região não garante o melhor resultado para aplicação em outra área.

Uma vez definido o valor do centro (ou vértice) da grade regular é necessário definir superfícies de ajuste que determinam o comportamento da altitude dentro de cada célula do modelo. O processo de refinamento de uma grade é um exemplo do uso de uma superfície de ajuste.

O refinamento da grade de um MDE *raster* consiste em diminuir o espaçamento entre pontos da grade de forma a adensá-la. A estimativa dos valores de Z desses novos pontos é feita a partir do processo de reamostragem, utilizando interpoladores do tipo vizinho mais próximo, bilinear ou convolução cúbica. Para variáveis contínuas, como elevação, não há diferença real entre reamostragem e interpolação (Chrisman, 1997).

Pode-se também criar um MDE *raster* a partir de um modelo de rede irregular triangular (TIN). Esse procedimento é útil quando se quer visualizar o modelo em projeção planar a partir de uma grade regular, e o único modelo que se dispõe é o de grade irregular. As transformações relacionadas com o TIN são bastante diferentes das demais, uma vez que os triângulos formados especificam um único plano. Desta forma, a amostragem para geração de uma grade regular envolve apenas extração do valor implicitamente armazenado na equação que define o plano (Chrisman, 1997).

2.1.2.4.2. Transformações para geração das redes com estrutura irregular (MDE TIN)

A rede irregular triangular (MDE TIN) pode ser gerada, conforme apresentado no Quadro 3, a partir de amostras (pontos, isolinhas) de outra grade regular ou irregular (TIN).

A geração a partir de pontos cotados já foi discutida anteriormente. A geração do TIN a partir de isolinhas é um dos métodos mais comuns de construção dessa estrutura de representação. Por outro lado, a construção de um bom TIN a partir de isolinhas não é uma tarefa fácil, pois envolve o conhecimento dos princípios de amostragem e do potencial de geração de triângulos planos em superfícies do relevo que não se comportam dessa forma (Esri, 1996).

Os triângulos planos são freqüentemente gerados ao longo das isolinhas quando a distância dos pontos amostrais ao longo dessa isolinha é menor do que a distância entre as isolinhas. Quando esses vértices em excesso não são removidos, a triangulação de Delaunay considera esses pontos amostrais, gerando então os triângulos planos. Para controlar a geração desses triângulos alguns cuidados devem ser tomados durante o processo de conversão das isolinhas para o formato digital. Se o método de conversão for via *scanner*, deve-se adotar algum procedimento de generalização cartográfica; se for por digitalização, deve-se capturar os pontos nas inflexões ao longo das isolinhas; e se for por meio de seleção de pontos pelo operador, deve-se proceder à seleção criteriosa dos pontos que apresentem fidedignamente o relevo (Esri, 1996).

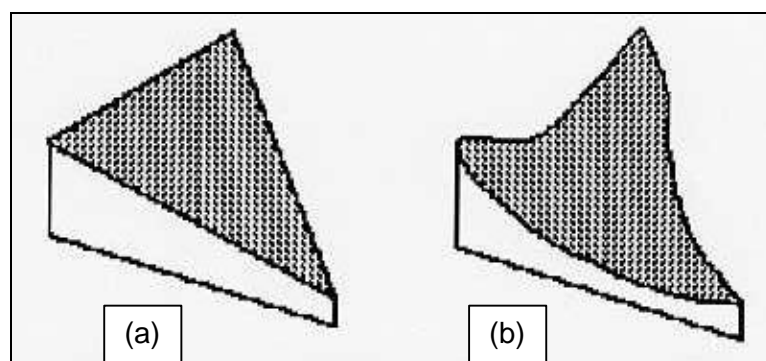
A produção de um TIN a partir de um MDE *raster* envolve também a seleção de pontos representativos. A densidade de pontos do MDE *raster* é constante, enquanto a do TIN é variável. De forma ideal, deveriam ser utilizados métodos que identificassem áreas de declividade e orientação constantes, de forma que essas áreas se tornassem faces dos triângulos. Entretanto, o que se observa, em geral, é a simples extração de pontos de altitudes do MDE *raster* para se efetuar a triangulação (Chrisman, 1996).

Os interpoladores mais utilizados no ajuste das superfícies de grades irregulares são lineares ou quárticos. A interpolação linear considera o

terreno como uma superfície contínua facetada formada por triângulos planos. A perpendicular à declividade da superfície é constante em toda a extensão da faceta triangular. A transição entre dois triângulos adjacentes é feita de forma abrupta. O interpolador calcula o valor Z do ponto, interceptando uma linha com o plano definido com os três nós do triângulo. As linhas de quebra não influenciam a interpolação linear (ESRI, 1996).

O interpolador quártico também considera a superfície de forma contínua, utilizando, neste caso, um polinômio de ajuste de quinta ordem. Entretanto, a normal à superfície varia de forma contínua dentro de cada triângulo, de forma a ocorrer uma suavização entre as bordas dos triângulos. Suas facetas podem ser côncavas ou convexas, dependendo do comportamento dos triângulos adjacentes. As linhas podem estar ou não presentes nesses interpoladores. Quando presentes, atuam como barreiras ao interpolador (Esri, 1996).

O interpolador linear é recomendado quando a superfície tiver sido sistematicamente amostrada, de forma a incluir pontos significativos, tais como locais de máximo e mínimo e pontos de inflexão e de quebra de linhas. O quártico é recomendado quando os pontos amostrais são obtidos de localizações arbitrárias e de forma esparsa. O esforço computacional é mais intenso na interpolação quártica. Com o aumento da densidade de pontos (nós), os dois métodos de interpolação tendem a gerar resultados similares. Figura 7 mostra o ajuste de superfície pela interpolação linear e quártica.



Fonte: Esri (1996).

Figura 7 – Ajuste de superfície de um mesmo triângulo, respectivamente pela interpolação linear (a) e quártica (b).

2.1.3. Produtos derivados dos modelos digitais de elevação, análises e aplicações

Diversas informações qualitativas e quantitativas podem ser extraídas a partir dos dados de altitude armazenados na estrutura dos modelos digitais de elevação (pontos, *raster* e TIN). A exatidão dessas informações dependerá da qualidade do MDE gerado e dos algoritmos utilizados para sua extração. Apresentam-se a seguir, de maneira sintética, os principais produtos derivados dos modelos digitais, as análises realizadas e as principais aplicações⁴. Aspectos teóricos e alguns detalhes de implementação computacional podem ser obtidos em Burrough (1986), Erdas (1995) e Felgueiras (1998).

a) Geração de imagem MDE em níveis de cinza.

Estas imagens são geradas pelo mapeamento direto dos valores de altitude para valores contínuos de nível de cinza (Figura 8a). Para sistemas de 8 *bits* o mapeamento de cada pixel da imagem se dá em 256 níveis. Esses produtos, gerados sob a forma da estrutura *raster* ou TIN, são geralmente monocromáticos, mas podem também ser coloridos através de técnicas de pseudocoloração (Figura 8b). Este tipo de imagem é muito utilizado para análises qualitativas regionais da variação do relevo.

b) Geração de imagem MDE fatiada

O fatiamento do MDE, sobre imagens *raster* ou TIN, consiste em definir intervalos de cotas com o objetivo de gerar uma imagem temática. Cada classe está associada a um intervalo de cotas altimétricas dentro da amplitude de variação da altitude (Figura 8c, d). A imagem gerada, em tons de cinza ou colorida, é freqüentemente utilizada em análises espaciais, como operações de álgebra de mapas (Felgueiras, 1998).

⁴ Este campo do conhecimento é denominado na área de geoprocessamento como análise do terreno (do inglês *terrain analysis*). Envolve o processamento e a simulação gráfica de dados contínuos, em especial os de altitude.

c) Geração de imagem MDE sombreada

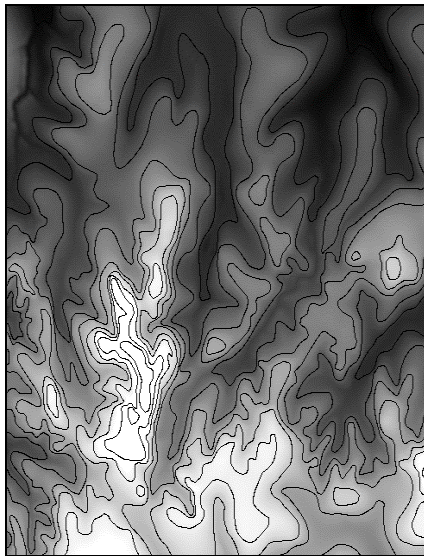
A geração de uma imagem MDE sombreada é realizada a partir de um modelo digital e do posicionamento do sol, em relação à superfície, que é definido pelo usuário. Com base nesse posicionamento definem-se áreas sombreadas e iluminadas, proporcionando, indiretamente, a noção de variação da elevação (Figura 8e). Esse produto é muito utilizado em estudos ecológicos, nos quais o conhecimento dos fluxos anuais de energia solar é importante, e em trabalhos de simulação do movimento do sol sobre a paisagem. Pode-se efetuar a sobreposição de imagens de sensoriamento remoto nesses produtos.

d) Normalização topográfica de dados de sensoriamento remoto.

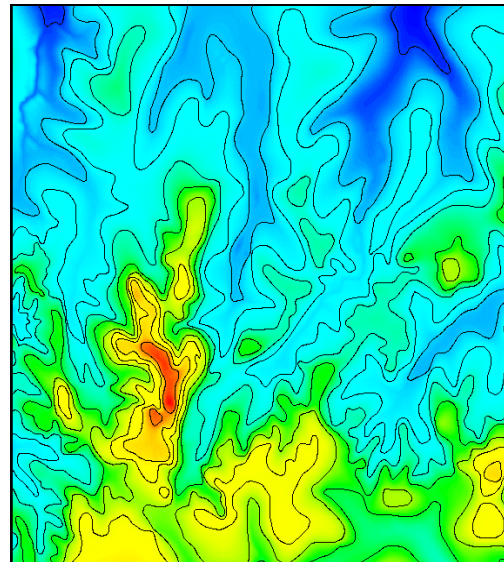
Dados digitais de sensoriamento remoto coletados em regiões montanhosas contêm distorções radiométricas proporcionadas pelo relevo. Essas distorções são observadas na forma de diferença de brilho nas imagens. Uma das maneiras de reduzir os efeitos do relevo nas imagens é aplicar transformações baseadas em modelos de reflectância lambertianos e não-lambertianos. O MDE *raster* é uma das fontes de dados para esses modelos (Erdas, 1995). A correção dessas imagens digitais é importante para estudos de comparação multitemporal de processos ambientais.

e) Geração de mapas de isolinhas

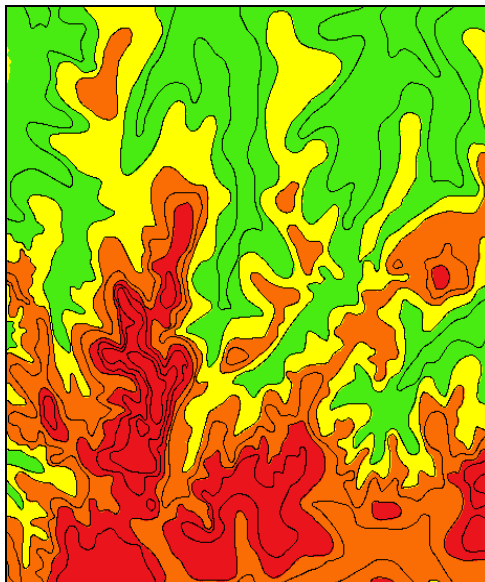
A geração de mapas de isolinhas a partir de um MDE é basicamente um processo de transformação de formas de representação do relevo, conforme apresentado no Quadro 3. As isolinhas são obtidas a partir de interseções com as arestas dos elementos básicos do modelo (células/*raster* ou triângulos). Para o MDE no formato *raster* existem, segundo Felgueiras (1998), basicamente dois métodos: o método seguidor de linhas e o de segmentos. A Figura 9a mostra o refinamento das isolinhas do MDE *raster* apresentado na Figura 9a.



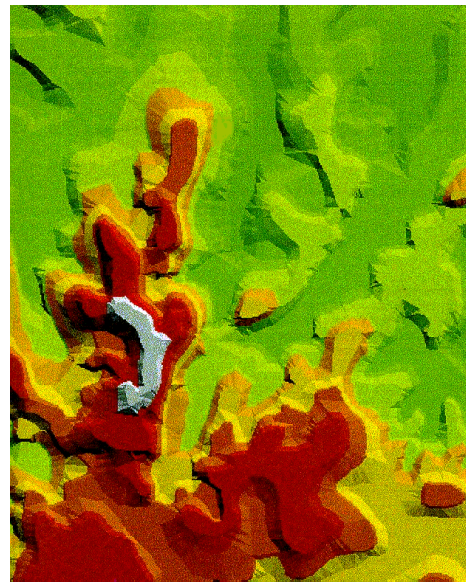
(a)



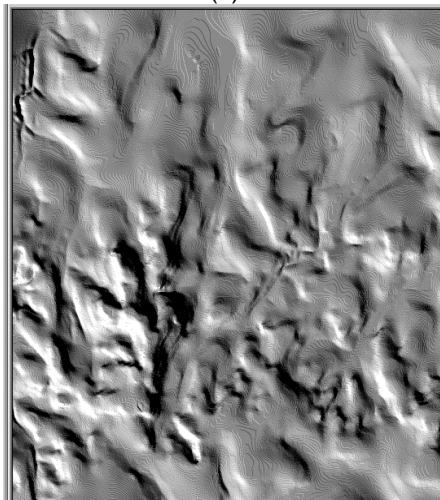
(b)



(c)



(d)



(e)

Legenda:

- a) Imagem MDE em nível de cinza (256 níveis) com curvas de nível espaçadas de 40 m.
- b) Imagem MDE em nível de cinza pseudocolorida com curvas de nível.
- c) Imagem MDE *raster* fatiada em classes de altitude com curvas de nível.
- d) Imagem MDE *TIN* fatiada em classes de altitude.
- e) Imagem MDE sombreada

Figura 8 – Imagens de MDE da região do bairro Ouro Preto, Belo Horizonte-MG.

f) Geração de mapas de declividade e orientação (exposição) das vertentes

A declividade de um ponto do relevo é definida pelo plano tangente a esse ponto na superfície do MDE. É expressa em graus (de 0 a 90) ou porcentagem, sendo calculada a partir da diferença dos valores da elevação ao longo de uma certa distância (Figura 9b). No caso de imagens MDE *raster*, a distância é calculada com base no tamanho da célula (pixel). Quando a superfície está representada por um modelo de grade triangular, o cálculo é feito sobre a superfície de ajuste utilizada para representar o comportamento do relevo dentro do triângulo que contém o ponto na posição determinada.

A orientação de cada pixel, expressa em graus (de 0 a 359), é dada pelo ângulo formado entre a linha da declividade do pixel e o norte (Figura 9c). Os valores variam a partir do norte no sentido horário, sendo 0 grau correspondente ao norte, 90 ao leste, 180 ao sul e 270 graus a oeste.

g) Outras análises

As análises de terreno efetuadas sobre os modelos digitais de elevação apresentam uma grande variedade de aplicações, além das apresentadas anteriormente. Podem ser citados ainda as análises de perfil topográfico (Figura 9d), as análises de visibilidade e o cálculo de volumes para projetos de engenharia. Recentemente destacam-se o desenvolvimento e o uso dos MDE para estudos de hidrologia superficial, o que será tratado com maiores detalhes no tópico seguinte.

2.2. Utilização dos modelos digitais de elevação (MDE) em estudos hidrológicos

Os processos hidrológicos, em especial os que ocorrem sobre a superfície terrestre, são, em geral, investigados através do uso de modelos distribuídos ou de modelos concentrados. De acordo com Smemoe et al. (1997), os modelos distribuídos estão no foco atual das pesquisas em desenvolvimento, enquanto os concentrados continuam a ser a principal sustentação operacional de projetos que necessitam desse instrumental analítico.

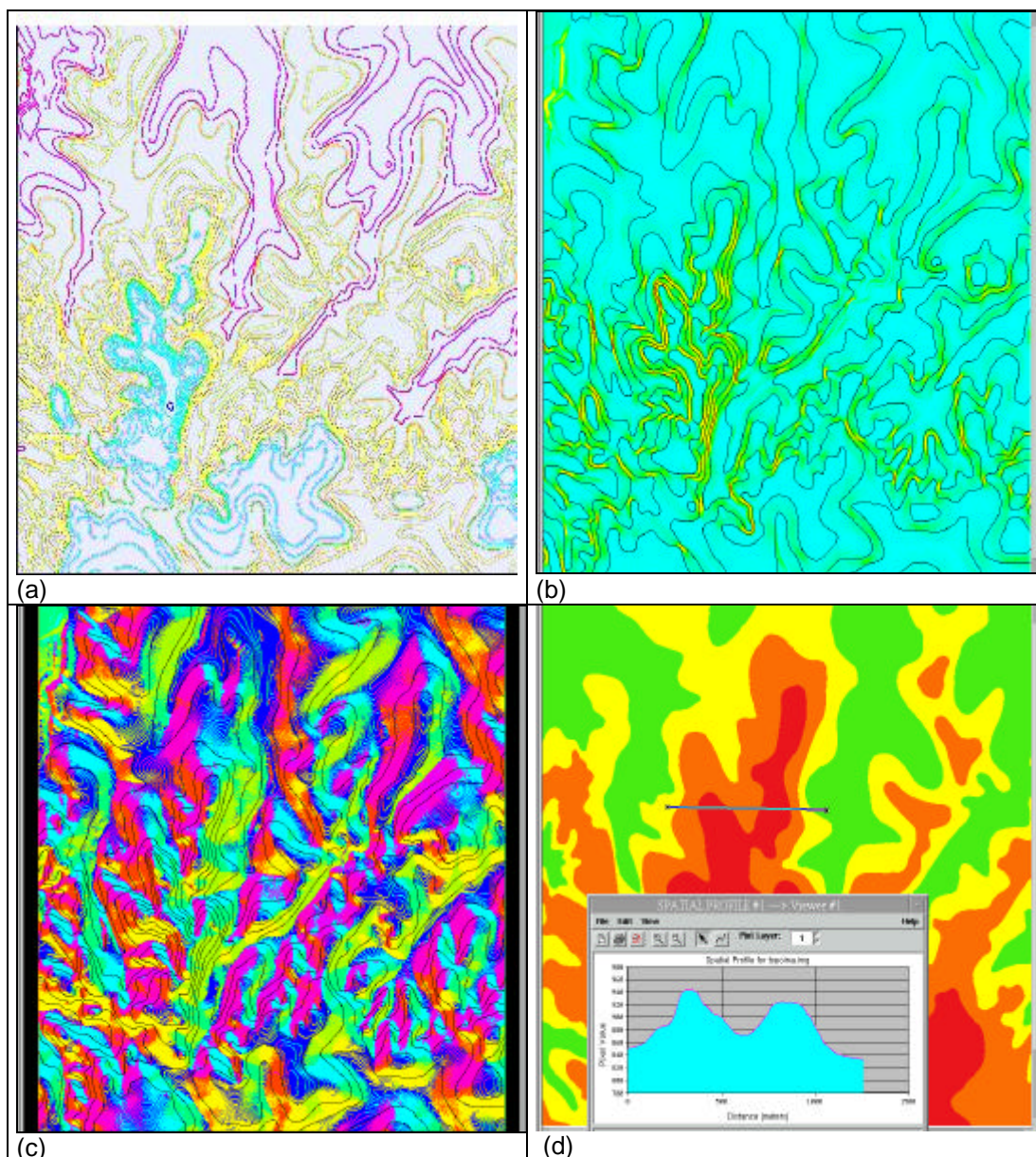
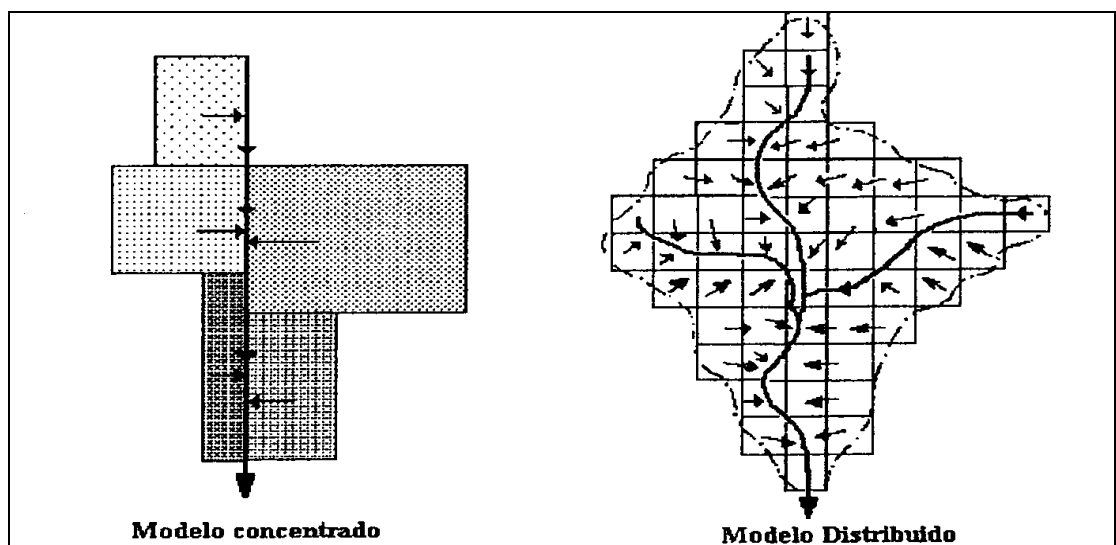


Figura 9 – Informações do relevo derivadas do MDE da Figura 8 com isolinhas superpostas: a) isolinhas espaçadas de 10 m, b) mapa de declividade (em azul menores valores e em amarelo/vermelho maiores declividades), c) mapa de orientação (exposição) e d) perfil topográfico do segmento sobreposto à imagem MDE fatiada.

Um dos aspectos que diferenciam esses dois tipos de modelos é a forma de tratar e avaliar as unidades de análise espacial. Os modelos distribuídos subdividem a bacia hidrográfica em elementos regulares e menores. As propriedades avaliadas dentro de cada um desses elementos de análise são consideradas homogêneas. Por sua vez, os elementos espaciais de análise dos modelos concentrados são maiores e irregulares (sub-bacias, por exemplo) e a variabilidade espacial das propriedades avaliadas é, em geral, representada pelo seu valor médio. A Figura 10 mostra a representação básica desses dois modelos para a mesma bacia hidrográfica.



Fonte: Mendes (1996).

Figura 10 – Representação básica dos modelos hidrológicos.

Segundo Mendes (1996), o uso de valores médios para os parâmetros e as variáveis nos modelos concentrados pode resultar em uma grande simplificação da realidade. Essa questão torna-se mais crítica à medida que se aumenta a extensão da área de estudo. Ainda segundo o autor, a utilização de modelos distribuídos reduz esse problema, mas introduz outros, como a necessidade de aquisição, manutenção e utilização de um extenso banco de dados georreferenciados e o grande esforço exigido para sua calibração e validação (Smemoe et al., 1997).

A abordagem tradicional dominante até então permite a simplificação da modelagem e reflete a impossibilidade operacional de obtenção de diversos parâmetros necessários para a alimentação dos modelos distribuídos, como tipos de uso do solo, classes de vegetação, características fisiográficas das bacias e dos canais, classes de declividade etc.

O desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas-SIG estimulou a construção de diversos sistemas integrados, conectando os modelos hidrológicos às bases de dados espaciais implementadas nos SIGs. Entretanto, as interfaces desenvolvidas apresentam algumas restrições de uso, como as mencionadas por Smemoe et al. (1997):

- As aplicações são tipicamente implementadas para modelos simples e, ou, para opções específicas de um dado modelo.

- Uma vez que as interfaces são construídas sobre os SIGs, torna-se necessário adquirir as licenças de uso dos softwares e, conseqüentemente o treinamento dos usuários.

- As interfaces são, em geral, de uso complicado porque os SIGs dispõem de ferramentas de análise espacial genéricas, e não necessariamente desenvolvidas para a modelagem hidrológica.

Para Maidment (1996), a questão principal a ser respondida não é como acoplar os modelos existentes às bases de dados disponíveis nos SIGs, mas sim como desenvolver novos modelos hidrológicos, aproveitando-se das vantagens e da capacidade de organização dos dados espaciais nos SIGs. A solução dessa questão implicaria reverter as prioridades tradicionais da modelagem hidrológica que tem enfatizado a forma de representação dos processos físicos em detrimento da sistemática na qual seus parâmetros e suas variáveis são obtidos⁵.

⁵ Sobre a ótica dos sistemas de inquirição o autor aparentemente propõe a passagem do sistema leibniziano para o sistema kantiano.

No primeiro sistema a "verdade" situa-se no campo da lógica ou do pensamento formal. A verdade do modelo é medida em termos de sua habilidade em oferecer uma explanação teórica de ampla gama de fenômenos gerais e da habilidade de seus construtores em explicitar as condições formais sob as quais o modelo persiste. O corolário desse conceito é que a verdade do modelo não jaz sobre qualquer consideração externa, isto é, sobre os dados, o que implica que a única proposição geral universal aceitável é aquela que puder ser justificada a partir do modelo, pois qualquer conclusão a partir de um conjunto finito de dados é inadequada e perigosa.

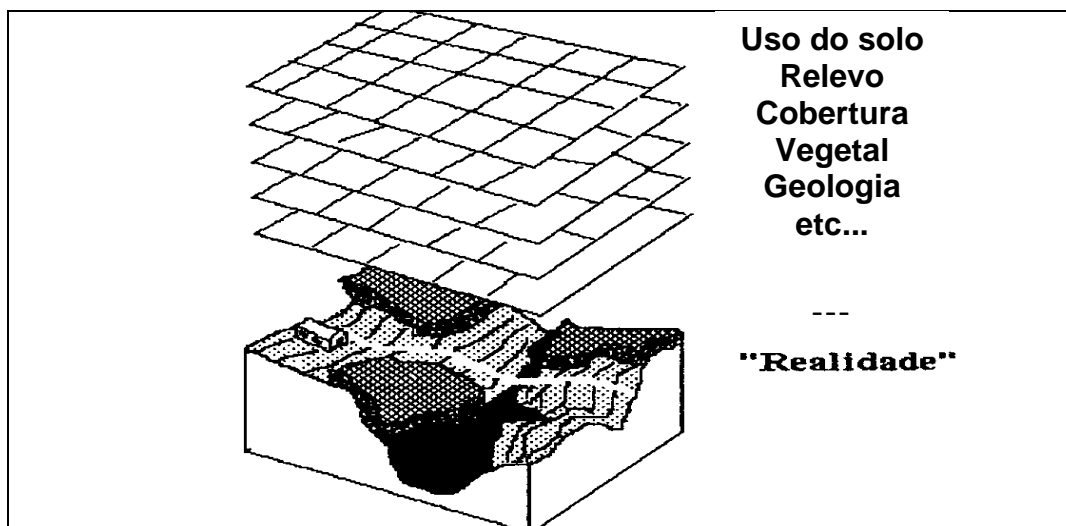
Com o advento de novos sensores remotos orbitais e do desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas, a modelagem hidrológica deve, segundo Maidment (1996), enfatizar primeiramente a descrição digital do ambiente e, a partir daí, a formulação dos modelos de processos que se ajustariam aos dados disponíveis e à descrição ambiental digital. Nesse contexto, é mais indicado utilizar a terminologia Modelo Hidrológico Espacial, definida e proposta por esse autor como sendo aquele modelo que simula os fluxos e o transporte de sedimentos ou poluentes em uma determinada região da superfície terrestre, utilizando a estrutura de dados espaciais dos SIGs.

Os modelos hidrológicos espaciais potencializariam assim a forma de observação, representação, análise, compreensão e predição de processos hidrológicos do mundo real. A visão reducionista e mecanicista da ciência moderna apropria-se da modelagem matemática e da estrutura dos sistemas de informações para fragmentar a paisagem em compartimentos, na forma de camadas (*layers*), em busca da compreensão da “realidade” (Figura 11).

Os modelos hidrológicos, independentemente de serem concentrados, distribuídos ou espaciais, requerem parâmetros e variáveis ambientais para a sua inicialização, calibração e funcionamento. O relevo fornece informações fisiográficas importantes para esses modelos e outros estudos hidrológicos, tais como a identificação da rede de drenagem, as linhas de cumeada e fundo de vales, os padrões de drenagem, a identificação, localização e quantificação de bacias hidrográficas e de suas sub-bacias, o comprimento e a declividade dos canais e as propriedades geométricas das bacias (Martz e Garbrecht, 2000).

Nas últimas duas décadas essas e outras informações têm sido extraídas diretamente de representações digitais do relevo (MDE), tanto no formato *raster* quanto no formato TIN, com predomínio do primeiro. Para isso

Por outro lado, o sistema de inquirição kantiano engloba o campo dos dados (sistema lockeano), dos fatos e da teoria (sistema liebiniziano), pois a verdade é sintética, não estando contida nem na sua vertente teórica nem na empírica, mas em ambas. Assim, a habilidade do modelo em expressar a “verdade” estaria na sua habilidade em associar a sua teoria implícita com alguma referência empírica e em mostrar que com a coleção de dados existe uma referência teórica associada. Como corolário à definição de verdade tem-se que nem a teoria nem os dados seriam preponderantes sobre o outro e inseparáveis; as teorias e as conclusões são deriváveis de dados, mas estes são, por sua vez, deriváveis de outra base teórica, tais como as teorias de “como se fazer observações” e “o que observar”.



Fonte: adaptado de Mendes (1996).

Figura 11 – Representação espacial matricial dos compartimentos que compõem a realidade da paisagem.

diversas metodologias foram desenvolvidas, sendo que algumas delas implementadas em módulos específicos dos sistemas de informações, conforme apresentado na Quadro 4.

Quadro 4 – Relação de rotinas comerciais implementadas para extração de informações hidrológicas disponíveis nos principais sistemas de informações geográficas

| Software | Rotina | Proponente | Formato |
|--------------|--|---------------------------------------|---------------|
| Anudem 4.6.1 | - | <i>Australian National University</i> | <i>Raster</i> |
| Grass 4.1 | r.watershed/Grass | USA-CERL | <i>Raster</i> |
| ArcInfo | Topogrid/ArcGRID | ESRI | <i>Raster</i> |
| ArcView | <i>Hidrologic Modelling/Watershed Delineator-Spatial Analyst</i> | ESRI | <i>Raster</i> |
| GEOTERRAIN | <i>Drainage Tools</i> | GEOPAK/BENTLEY | TIN |

Tribe (1991), citando outros autores, lista os motivos pelos quais o formato *raster* tem sido o mais utilizado. A escolha desse formato baseia-se na sua simplicidade de armazenamento, no fato de as coordenadas de localização x e y estarem implícitas na matriz do formato *raster*, na maior facilidade de implantação dos algoritmos e, principalmente, no fato de as agências governamentais americanas disponibilizarem os dados de altitude nesse formato.

As justificativas normalmente apresentadas na literatura para o crescimento da extração automática de informações de interesses hidrológico a partir de modelos digitais de elevação são:

- Aumento da disponibilidade de dados digitais de elevação

Nos Estados Unidos os modelos digitais de elevação (*raster*) mais utilizados são distribuídos por órgãos governamentais, como o Serviço Geológico Americano (USGS), a Agência Nacional de Imageamento e Mapeamento (NIMA) e o Centro Nacional de Dados Geográficos (NGDC).

Os MDEs produzidos pelo USGS são classificados em três níveis, com base na origem do dado, no tipo de processamento e no RMSE Vertical (*Root Mean Square Error*). Para o nível 1 o RMSE desejável é de 7 m, sendo 15 m o valor máximo tolerado. No nível 2, de uso mais difundido, os dados são consistidos e editados para remoção de erros sistemáticos. O RMSE máximo permitido nesse caso é a metade do intervalo entre as isolinhas do mapa topográfico utilizado e não há erros maiores do que um intervalo de isolinha. O nível 3 é o de melhor qualidade, mas de disponibilidade limitada. Para sua geração utilizam-se pontos cotados, isolinhas digitais e feições hidrográficas. O RMSE máximo permitido é da ordem de um terço do intervalo da equidistância vertical e não são observados erros maiores do que dois terços desse intervalo. Empresas privadas também atuam na comercialização de modelos digitais de elevação, agregando refinamentos aos processos de geração dos modelos (Martz e Garbrecht, 2000).

O fornecimento desses dados via CD-ROM e através da internet contribuiu sobremaneira para a disseminação de seu uso (Tribe, 1991; Maidment, 1996). Na internet, diversas bases de dados de elevação

continentais e mundiais são disponibilizadas gratuitamente ou a baixo custo, como as geradas pelos projetos GTOPO30 – com resolução de 30 segundos (1 km) (USGS, 1996) e HIDRO1K (USGS, 1997).

No Brasil, as instituições públicas responsáveis pelo mapeamento sistemático nacional ainda não geram e comercializam modelos digitais de elevação e, por essa razão, não estabeleceram padrões mínimos de qualidade para referenciar tecnicamente a sua produção por empresas privadas nacionais que executam esse tipo de serviço de forma esporádica. Uma experiência pioneira tem sido conduzida pela Universidade Federal de Viçosa na geração de modelos digitais de elevação para toda a área da Amazônia Legal, no âmbito do Projeto SIVAM.

- Vantagens inerentes ao processo automatizado:

Dentre as vantagens inerentes aos métodos de extração automática de informações fisiográficas, em substituição aos processos manuais tradicionais, destacam-se:

1. O trabalho menos tedioso e realizado com menor esforço e gasto de tempo (Band, 1996; Burrough, 1986; Jenson e Domingues, 1988). Os métodos automáticos apresentam resultados mais facilmente reproduzíveis⁶ do que os métodos manuais, por serem menos subjetivos (Tribe, 1992).

2. As informações geradas são facilmente importadas, integradas e analisadas pelos sistemas de informações geográficas (Tribe, 1992; Martz e Garbrecht, 2000).

3. O aumento da capacidade de processamento dos computadores e expansão do uso dos sistemas de informações geográficas decorrente da redução dos custos de *hardware* e *software*.

⁶ A ciência é um corpo de conhecimentos teóricos e experimentais dos mais renomados e respeitados por possuir regras que permitem que diferentes pessoas, em diferentes épocas e situações, possam na prática e na teoria chegar às mesmas observações e conclusões. Para que a ciência seja algo estável em seu modo, já que o que se pretende com esta atividade é ter um referencial de acesso e transferência de conhecimento, chegou-se a uma maneira de fazer ciência que é um modo consensual. A consensualidade é um critério de qualidade do conhecimento e se estabelece na reprodutibilidade do experimento. A reprodutibilidade se afirma como o processo de poder acessar qualquer fenômeno da natureza com um mesmo instrumental teórico e prático, de tal modo que qualquer pessoa em qualquer tempo e circunstância, respeitadas as regras de observação, deverá vir a obter os mesmos resultados obtidos pelos antecessores. A reprodutibilidade implica que o que se observa tenha permanência no tempo e no espaço (Martins, 2001).

O aumento do desempenho dos computadores permitiu a redução no tempo de processamento, viabilizando o uso da técnica para um conjunto maior de dados. A redução dos custos da tecnologia fez com que mais usuários passassem a utilizar os algoritmos implementados nos sistemas de informações geográficas. A tecnologia, até então restrita às instituições governamentais, passou também a ser utilizada por pequenas empresas de consultoria.

4. A melhoria nos métodos de processamento dos modelos digitais de elevação.

Diversos métodos foram desenvolvidos com o objetivo de aumentar a eficiência do processamento para extração de informações hidrológicas, assim como de aumentar a precisão dos MDEs nas aplicações de recursos hídricos. O tópico seguinte apresenta os principais avanços obtidos nessa área.

Dentre as desvantagens para uso de métodos automáticos para extração de variáveis fisiográficas de bacias hidrográficas, embora não explícitas na literatura consultada, pode-se destacar a necessidade de aquisição do software, treinamento específico para os usuários e a dependência da existência da base de dados planialtimétricas no formato digital.

2.3. Métodos utilizados para extração de feições fisiográficas de interesse em estudos hidrológicos a partir de modelos digitais de elevação (MDE)

Nos últimos anos observou-se o aumento substancial de métodos disponíveis para extração de informações fisiográficas de interesse em estudos hidrológicos a partir dos modelos digitais de elevação. Os métodos variam quanto ao formato do MDE utilizado (*raster* ou TIN) e quanto à feição de interesse a ser extraída.

2.3.1. Extração de feições fisiográficas a partir de modelos *raster*

Os principais métodos desenvolvidos para extração automatizada de feições fisiográficas de interesse hidrológico passam inicialmente, na maioria dos casos, pela identificação da rede de drenagem numérica.

2.3.1.1. Identificação da rede de drenagem numérica

Duas amplas abordagens são apresentadas na literatura para a resolução desse problema. A primeira envolve a avaliação local das cotas do modelo através do deslocamento de um filtro sobre o MDE *raster*. Com isso identificam-se locais de concavidade voltada para baixo (Puecker e Douglas, 1975) ou áreas em forma de V (Jenson, 1985), citados por Martz e Garbrecht (1992). O mapa dessas áreas identificadas pode ser considerado como uma aproximação da rede de drenagem. As duas maiores limitações dessa abordagem consistem nos fatos de que a técnica de detecção atua de forma localizada e gera segmentos de rede descontínuos que ainda precisam passar por uma etapa de pós-processamento para geração de um padrão de drenagem conectada. Essa abordagem é de pouca utilidade em paisagens de topografia complexa ou com predominância de áreas planas (Band, 1986).

A segunda abordagem define a rede de drenagem a partir da simulação do caminho preferencial de escoamento superficial da água sobre o modelo digital de elevação *raster*. Essa abordagem, proposta originalmente por O'Callaghan e Mark (1984), serviu de base para o desenvolvimento de várias técnicas, tais como as propostas por Jenson e Dominique (1988) e Martz e Garbrecht (1992) e outras que as sucederam. Embora existam algumas variações entre as implementações específicas, essa abordagem envolve essencialmente quatro etapas seqüenciais de processamento:

- geração do modelo digital de elevação *raster* (discutido no item 2.2.) e sua projeção para um sistema de coordenadas;
- preenchimento das depressões espúrias;

- identificação do caminho descendente do escoamento superficial entre cada célula do MDE *raster* e suas células vizinhas (direção de escoamento).

- Cálculo do fluxo acumulado

A direção do escoamento superficial é calculada pelo método D8 (determinístico de oito células vizinhas), que considera apenas uma das oito direções possíveis de escoamento para cada uma das células do modelo digital de elevação – norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste. Cada opção está associada a uma codificação numérica específica em um novo arquivo *raster* digital de mesma resolução espacial (Figura 12).

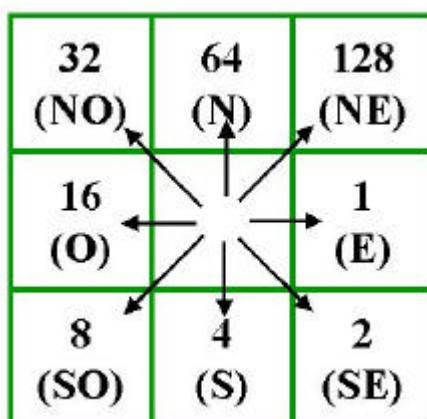
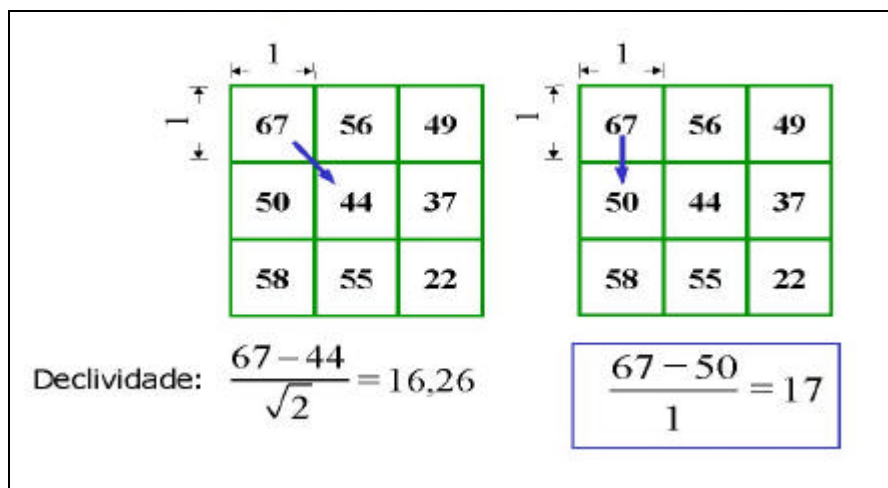


Figura 12 – As oito possíveis direções de escoamento, codificadas em um sistema de base 2, para cada uma das células do MDE.

Por esse método, a escolha do único caminho possível de deslocamento da água em cada uma das células do MDE é dada pela direção do maior declive, conforme ilustrado na Figura 13.

Com esse arquivo de direção de escoamento estabelece-se, na ausência de depressões naturais ou espúrias, a conectividade entre cada uma das células, de forma a permitir, em conjunto com o arquivo de fluxo acumulado, a extração da drenagem numérica. A Figura 14 mostra a extração da drenagem a partir de um MDE *raster* hipotético.



Fonte: Ribeiro (2000).

Figura 13 – Cálculo do caminho preferencial da água que cai numa célula (altitude 67 m) localizada na borda de um MDE hipotético. A direção de escoamento é dada no sentido da célula de maior declividade.

O fluxo acumulado, expresso em termos de número de células do MDE, é uma medida da área de drenagem de cada ponto da superfície do MDE. O valor do fluxo acumulado torna-se maior ao longo de cada célula do caminho do escoamento preferencial, conforme ilustrado na Figura 15.

A extensão e a densidade da rede de drenagem numérica identificada são então determinadas através da definição de um limiar de fluxo acumulado (área mínima da bacia de acumulação). Portanto, todas as células que possuam o valor de fluxo acumulado superior ao limiar previamente estabelecido são classificadas como parte da rede de drenagem numérica (Figura 16).

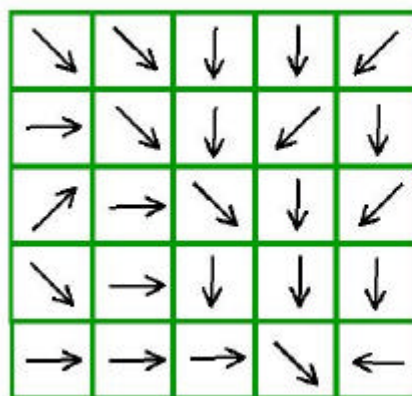
O método D8 desconsidera os efeitos de inércia, fricção e infiltração e a existência de sumidouros naturais de água. Além disto, de acordo com Martz e Garbrecht (2000), o método falha na representação adequada de escoamento divergente sobre superfícies convexas, podendo induzir a erros na orientação do caminho do escoamento superficial. Embora o algoritmo de múltiplas direções tenda a produzir resultados mais consistentes em regiões de relevo meia-laranja e nas áreas de cabeceiras dos rios, a abordagem do método D8 é superior em zonas de escoamento convergente e ao longo de

| | | | | |
|----|----|----|----|----|
| 67 | 56 | 49 | 46 | 50 |
| 53 | 44 | 37 | 38 | 48 |
| 58 | 55 | 22 | 31 | 24 |
| 61 | 47 | 21 | 16 | 19 |
| 53 | 34 | 12 | 11 | 12 |

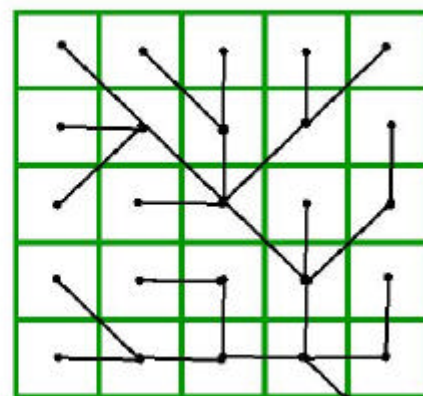
(a) MDE raster

| | | | | |
|-----|---|---|---|----|
| 2 | 2 | 4 | 4 | 8 |
| 1 | 2 | 4 | 8 | 4 |
| 128 | 1 | 2 | 4 | 8 |
| 2 | 1 | 4 | 4 | 4 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 16 |

(b) Codificação das direções de escoamento



(c) Direção do escoamento



(d) Drenagem numérica com limiar 0

Figura 14 – Processo de extração da drenagem numérica.

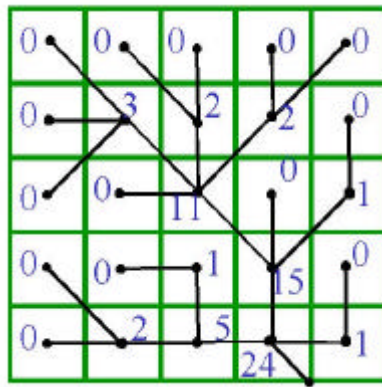
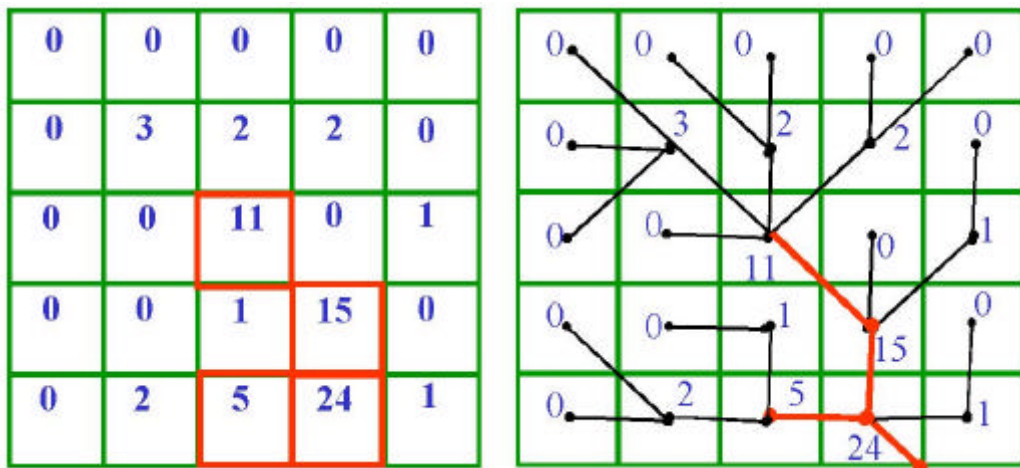


Figura 15 – Arquivo *raster* de fluxo acumulado.



Fonte: Ribeiro (2000).

Figura 16 – Identificação das células e da drenagem numérica com limiar de fluxo acumulado superior a 4 células (em vermelho) ou a 0 célula (Figura 5).

vales bem definidos. Se o objetivo principal do uso do método é a extração da rede de drenagem de grandes áreas com canais bem definidos, o uso de um algoritmo de uma única direção parece ser mais apropriado (Martz e Garbrecht, 1992).

Ainda segundo esses autores, a maior dificuldade do uso das técnicas que se baseiam no método D8 para o mapeamento da rede de drenagem e a delimitação de bacias hidrográficas é a existência de depressões nos modelos digitais de elevação (MDE). Para solucionar essa questão é usual a identificação e, ou, remoção dessas depressões e áreas planas dos MDEs antes de dar continuidade às etapas seguintes de processamento. A ausência desse procedimento pode alterar significativamente a direção do escoamento superficial (GisHidro, 2000).

Depressões são células cercadas por células com maiores valores de elevação. Sua presença em um MDE produz a descontinuidade do escoamento superficial descendente para uma célula vizinha (Figura 17). Por definição, as depressões incluem áreas planas e depressivas. Algumas delas podem ser naturais, como os sumidouros observados em região de Karst (Figura 18), mas a maioria delas é considerada espúria, decorrentes do próprio processo de geração do MDE (amostragem e interpolação) e da truncagem dos valores interpolados para números inteiros na saída do modelo. Em geral, quanto maior a resolução do MDE maior é a possibilidade de ocorrência de depressões espúrias e áreas planas.

Outra fonte de erro normalmente existente nos MDEs são as falsas cristas, que ao contrário das depressões constituem-se de células circundadas por outras de menor valor. Entretanto, esse tipo de erro é menos prejudicial ao cálculo da direção de escoamento (ESRI, 1996).

Vários métodos têm sido desenvolvidos para solucionar as questões das áreas planas e depressivas nos MDEs. Martz e Garbrecht (1992, 2000) apresentam uma revisão exaustiva desse assunto. Band (1986) propôs a elevação do valor das células das depressões espúrias até o ponto em que se estabeleça o escoamento superficial para a célula vizinha adjacente de menor declividade. Como restrição ao processamento, estabeleceu-se que o escoamento não poderia retornar à célula de origem. Segundo os autores, esse método é eficiente somente para situações topográficas mais simples.



Fonte:GisHidro (2000).

Figura 17 – Vista transversal de: a) uma depressão espúria de um MDE e b) depressão espúria preenchida.

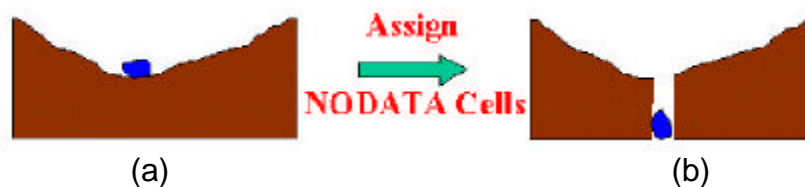


Figura 18 – Vista transversal de uma depressão natural (sumidouro) de um MDE (a) e o assinalamento de célula NODATA para representação computacional (b).

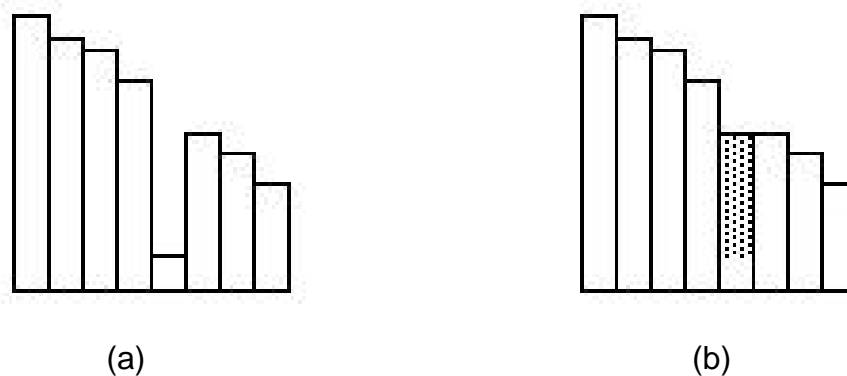
O'Callaghan e Mark (1994) sugeriram a suavização do MDE antes de se efetuar as análises das depressões, no sentido de reduzi-las em número e área. Para as depressões remanescentes, definem-se a área da depressão através de uma operação local (filtro 3x3) e o ponto de menor altitude ao longo do perímetro dessa área. O caminho de escoamento superficial, no trecho do escoamento entre a depressão e o ponto identificado, é invertido, conectando-se a células que tenham um caminho descendente disponível. Para Martz e Garbrecht (1992 e 2000), esse método soluciona a ocorrência de pequenas depressões, mas pode gerar um escoamento superficial contorcido e tem dificuldade com depressões complexas e áreas planas. Além disto, o processo de suavização reduz o conteúdo de informação do MDE.

Jenson e Domingue (1988) e Martz e De Jong (1988) produziram métodos para tratar depressões de maneira mais genérica e efetiva

(Freeman, 1991). Esses primeiros pesquisadores introduziram o conceito de drenagem forçada em um algoritmo concebido para o delineamento automático de bacias hidrográficas. O programa eliminava as depressões espúrias através do aumento da elevação da cota da depressão até o valor da menor cota da célula vizinha ou através do abaixamento da cota dessa célula vizinha para um valor inferior ao da depressão. O pré-processamento do MDE realizado dessa forma permitia a formação de uma rede de drenagem conectada. Para Martz e Garbrecht (1992, 2000), esses métodos solucionam situações topográficas mais complexas, como depressões agregadas, depressões com áreas planas e áreas planas na borda de um MDE.

Essa abordagem encontra-se implementada no módulo GRID do *software* ArcInfo e na extensão *Spatial Analyst* do *software* ArcView como parte integrante do comando FILL (Saunders, 2000). Esta forma de tratar o problema implica assumir que todas as depressões são resultantes de uma subestimativa do valor da elevação nos pontos de depressão ou devido à existência de células vizinhas com elevações superestimadas. Em alguns casos é mais indicado remover a obstrução do que preencher a depressão (Figura 19).

Os algoritmos que incorporaram o conceito de drenagem forçada foram, então, utilizados em diversos trabalhos para geração de dados digitais de rede hidrográfica e delimitação de bacias hidrográficas. Entretanto, o uso desses algoritmos não garante, especialmente em áreas planas com baixa densidade de dados altimétricos, a concordância espacial entre o traçado da drenagem numérica e o da hidrografia mapeada (Rubert et al., 1999). Tal fato compromete seriamente qualquer estudo hidrológico de superfície (Verdin e Jenson, 1996). Assim, um modelo digital de elevação que não seja hidrológicamente consistente torna-se de pouca utilidade para estudos dessa natureza.



Fonte: Esri (1996).

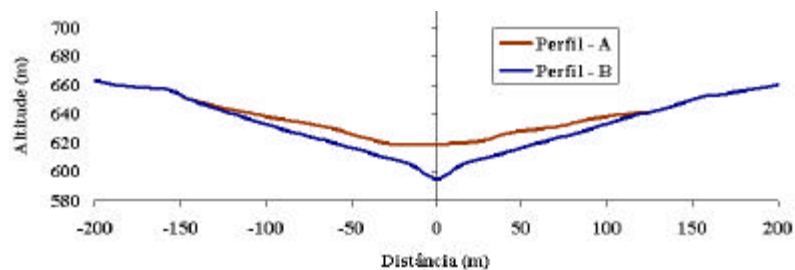
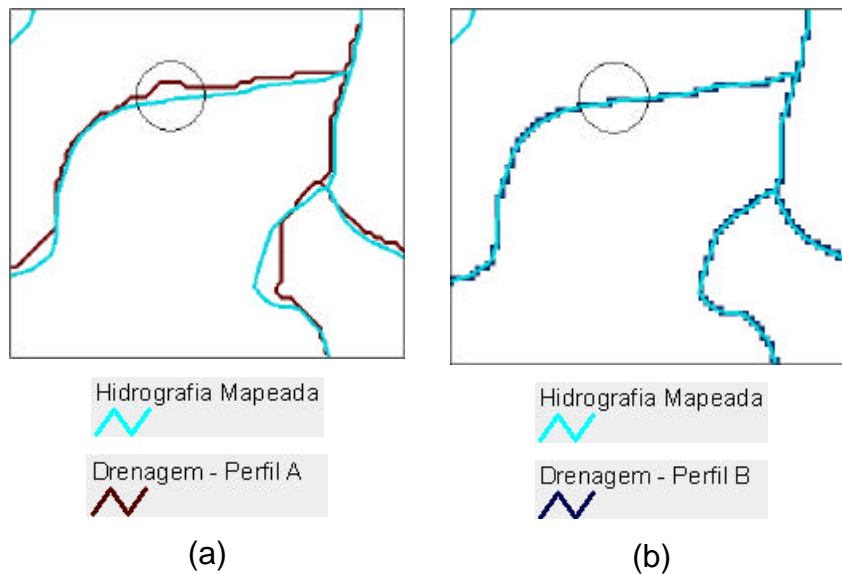
Figura 19 – Remoção de pontos de depressão. (a) Caracterização de uma depressão; (b) elevação de valores de altitude subestimados.

2.3.1.1.1. Refinamentos dos processos de identificação da rede de drenagem numérica

Uma vez que a remoção das falsas depressões não assegura a correta reprodução da linha de escoamento da água ao longo da superfície, conforme apresentado no item anterior, novas metodologias foram desenvolvidas no sentido de obter um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC).

O MDEHC pode então ser definido como a melhor representação digital do relevo no formato matricial ou TIN capaz de reproduzir, com a máxima exatidão, o caminho preferencial de escoamento da água superficial observado no mundo real. A Figura 20 mostra a comparação de um segmento de drenagem extraído da drenagem mapeada (bases cartográficas) e a drenagem numérica extraída, respectivamente, de um MDE e um MDEHC.

Hutchinson (1989), desenvolvendo a idéia de drenagem forçada para resolução do problema apresentado, propõe a incorporação da rede de drenagem digital real, extraída das bases cartográficas durante o processo de geração do MDE. Sempre que houvesse a violação das condições de altimetria, dada pelo conjunto de isolinhas e, ou, pontos cotados, o traçado da hidrografia mapeada seria respeitado. Com isso, estaria assegurada a



Fonte: Rubert et al. (1999).

Figura 20 – Segmentos de drenagem numérica extraídos: a) de um MDE e b), de um MDEHC, com seus respectivos perfis.

coincidência espacial da drenagem numérica extraída com as áreas de menor altitude do modelo, configurando, assim, a criação de um MDEHC. Essa abordagem, conhecida na literatura como *stream burning*⁷, foi incorporada ao software Anudem, no aplicativo Topogrid do software ArcInfo e em outros que o sucederam.

Essa forma de abordar o problema provém da constatação óbvia na natureza, onde o curso d'água é um elemento real de fácil delimitação nas fotografias aéreas, enquanto a curva de nível não o é, pois trata-se de um elemento abstrato. Com isto, a intuição e a experiência do técnico responsável pela extração das isolinhas durante o processo de restituição

⁷ O termo *stream burning* é utilizado no sentido de forçar o escoamento a seguir o caminho da drenagem mapeada, aprofundando-se o relevo nas células pertencentes à hidrografia.

aerofotogramétrica são fatores preponderantes para a exatidão dessas feições (Rubert et al., 1999). A utilização do processo de *stream burning* é recomendada nos casos em que a exatidão da rede de drenagem numérica, do limite da bacia de contribuição e das variáveis derivadas é um fator preponderante. Como exemplo desses casos têm-se os estudos de outorga de água, de regionalização de vazões, de transporte de sedimentos e agrotóxicos, entre outros.

O uso do Topogrid requer, além dos dados de hipsometria, a obtenção da drenagem digital orientada para a direção de escoamento. Maidment e Saunders (1996) experimentaram o uso desse algoritmo em uma bacia hidrográfica dos Estados Unidos e constataram a sua eficiência para regiões com cerca de 90.000 células do modelo, mas imprópria para áreas maiores (cerca de 530.000 células). Atribuíram tal fato à dificuldade do algoritmo em incorporar um grande número de pontos de elevação no processo de interpolação.

Saunders (2000) apresenta uma revisão bibliográfica a respeito das limitações das técnicas de *stream burning* e das mais recentes técnicas desenvolvidas. De acordo com o autor, Saunders e Maidment (1996) e Reed (1999) relataram distorções nos limites das bacias delimitadas pelas técnicas até então existentes. Reed (1999) observou que, ao longo da drenagem numérica, a diferença entre a altitude dessas células e das células vizinhas (em terra firme) influencia de maneira significativa o assinalamento da direção de escoamento em áreas planas. Hellweger (1997) notou a tendência de formação de drenagens paralelas em áreas onde a diferença entre a drenagem mapeada e a drenagem numérica excede a uma célula do modelo. Em função dessas observações, novas metodologias de ajuste têm sido investigadas e propostas.

Hutchinson (1996) descreveu um processo de interpolação adaptativo para suavização de erros discretos entre células adjacentes do MDE. Esse processo também incorpora as isolinhas e a drenagem digital para interpolar uma superfície *raster* suavizada de um conjunto irregular de pontos de elevação. Esta abordagem é utilizada pelo software ANUDEM (*Australia National University DEM*).

Garbrecht e Martz (1997) desenvolveram o software TOPAZ (*Topographic Parameterization*). De acordo com Saunders (2000), esse programa não incorpora de forma explícita a drenagem mapeada na geração do MDE, mas emprega uma técnica de pré-processamento semelhante à do comando FILL do módulo GRID, do software ArcInfo, para eliminar as falsas depressões. Esse *software* também elimina as áreas planas de um MDE através da imposição de um relevo com base na topografia do terreno adjacente a essas áreas.

Hellweger (1997) criou um sistema de refinamento de superfícies, chamado de AGREE, para tentar solucionar a questão da formação de drenagens paralelas introduzidas pelos métodos que adotam a abordagem de *stream burning* em modelos *raster* de representação. Esse algoritmo é uma alternativa aos métodos que propõem simplesmente a diminuição do valor de altitude das células ao longo da drenagem mapeada (seguido da eliminação de depressões espúrias). As principais etapas do método são:

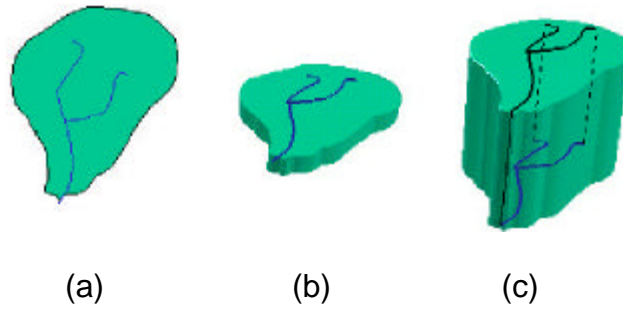
- *rasterização* da hidrografia mapeada digital (vetor), seguida da identificação espacial das células do modelo digital de elevação que correspondem a essa hidrografia; e

- aprofundamento do relevo ao longo da hidrografia *rasterizada* através do rebaixamento das cotas de altitude, com um valor constante, conforme apresentado na Figura 21c;

- criação de uma zona de entorno dessa hidrografia *digital raster (buffer)*; e

- assinalamento de valores de altitude para cada uma das células internas ao *buffer*, de forma a criar um plano inclinado entre as suas bordas e a hidrografia. A declividade desse plano pode ser controlada pelo usuário.

Esse procedimento garante que toda a água que chega até a zona de *buffer* atinja a calha do rio, de forma a obedecer ao trajeto da drenagem mapeada. Entretanto esse procedimento não assegura totalmente o perfeito escoamento da água ao longo da calha da drenagem, em especialmente em relevos planos, mesmo que se proceda ao pós-processamento para remoção de falsas depressões remanescentes. Este problema muitas vezes é decorrente do pequeno gradiente de elevação entre as cabeceiras e o ponto de deságüe causado pela baixa resolução vertical do MDE ou pela



Fonte: GISHYDRO (2000).

Figura 21 – Aprofundamento do relevo ao longo da drenagem (c) vista em plano (a) e em perspectiva no MDE original (b).

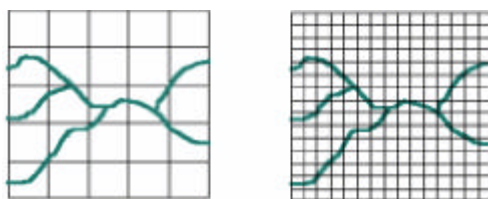
inexistência de dados altimétricos (Rubert et al., 1999; Reed, 1999, citados por Saunders, 2000). O desenvolvimento de métodos para a resolução desta questão ainda se encontra em aberto de acordo com a literatura consultada.

De acordo com Saunders (2000), o processo de *stream burning* através da integração da rede hidrográfica vetorial pode produzir bons resultados desde que algumas regras básicas sejam obedecidas, dentre as quais se destaca:

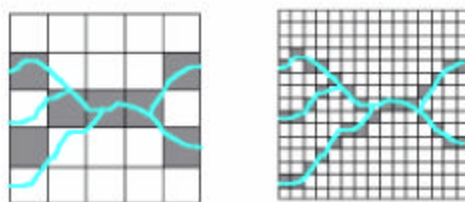
1. Observação quanto à escala do mapa que irá fornecer a rede de drenagem digital.

O tema drenagem vetorial utilizado para moldar o modelo digital de elevação nunca deve ser convertido para o formato *raster* de menor resolução espacial.

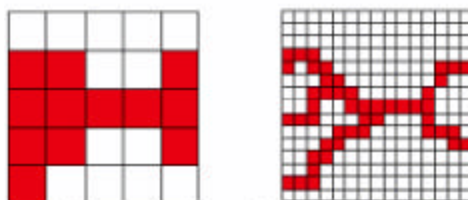
Na Figura 22a observa-se um trecho da drenagem vetorial extraído de um mapa na escala de 1:100.000 sobreposto a dois *grids* de resoluções diferentes (90 e 30 m, respectivamente). A Figura 23b mostra a drenagem rasterizada para essas duas resoluções e a Figura 23c mostra a comparação das drenagens vetorial e *raster*, onde se observa, para a resolução de 90 m, a omissão de representação de uma drenagem tributária.



(a) Dois *grids* conceituais de resoluções diferentes com a drenagem vetorial superposta



(b) *Rasterização* da rede de drenagem



(c) Rede hidrográfica *raster* e sua respectiva rede vetorial

Fonte:Saunders (2000).

Figura 22 – O processo de *stream burning* de drenagem em MDEs de diferentes escalas.

2) Pré-processamento da drenagem vetorial

Alguns procedimentos de edição do arquivo vetorial de drenagem precisam ser executados para garantir a geração de um padrão de drenagem conectada, dentre os quais podem-se destacar:

a) Remoção de lagos e represas, representados cartograficamente por polígonos fechados e que poderiam atuar como falsas depressões, interrompendo o caminho do escoamento superficial. Essas feições e suas ramificações devem ser substituídas por linhas simples conectadas às ramificações da rede de drenagem digital.

b) Remoção de linhas de costa em ambientes marítimos e sua substituição por pontos de deságüe da(s) bacia(s).

c) Rios de margem dupla devem ser representados por uma única linha central, de forma a garantir o escoamento sobre essa feição.

d) Nenhuma bifurcação de rios é permitida. Neste caso, deve-se desconectar os braços da drenagem no seu ponto de bifurcação, de forma a simular um único caminho de escoamento.

e) A linha do rio principal deve ter sua representação estendida até a borda do MDE correspondente.

f) Eliminação ou conexão de rios isolados à rede de drenagem.

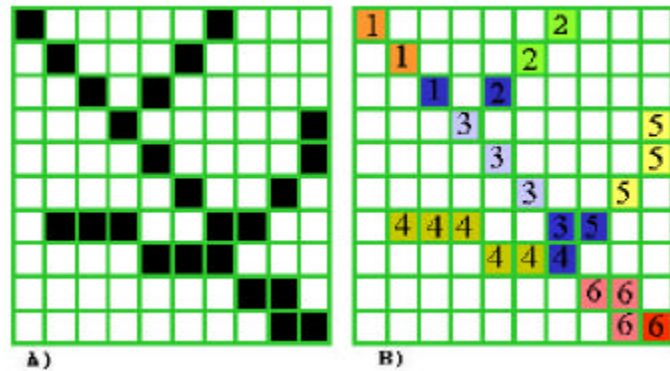
g) As feições hidrográficas próximas em bacias hidrográficas adjacentes devem ser mantidas de forma a minimizar distorções nas bordas das bacias hidrográficas.

2.3.1.2. Identificação de bacias e sub-bacias hidrográficas

Uma vez estabelecida a drenagem numérica, procede-se à sua segmentação de forma a identificar cada um de seus tributários e os seus respectivos pontos de deságüe (Figura 23). A partir desses dados e das matrizes de direção de escoamento e de fluxo acumulado pode-se efetuar a identificação das bacias/sub-bacias de contribuição.

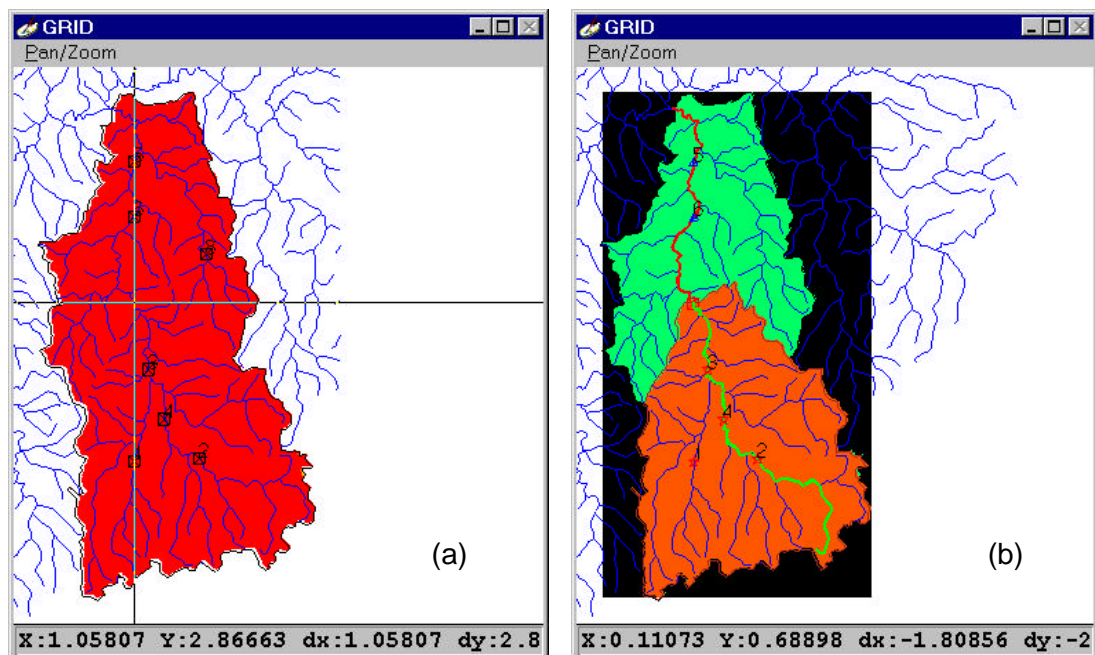
De acordo com Smemoe et al. (1997), os algoritmos de identificação podem trabalhar de duas formas. Alguns simplesmente delimitam as sub-bacias para cada ponto de ramificação da rede de drenagem numérica. Esse ponto é determinado pela célula imediatamente anterior ao encontro de duas drenagens (células azul-petróleo da Figura 23). Durante o processo de identificação pode-se incorporar parâmetros de controle para a delimitação das sub-bacias, como o valor do limiar de área de contribuição ou o número mínimo de células do tributário.

Uma outra forma de delimitação é através da interação com o usuário, a partir do acesso a uma interface gráfica. Neste caso o usuário identifica um determinado ponto de interesse para o qual se pretende delimitar a sua bacia de contribuição. Esse procedimento pode ser útil em processos de outorga de água, em construções de usinas hidrelétricas, etc. A Figura 24 mostra um tipo de aplicação dessa natureza, em que o interesse do usuário é a identificação da bacia de contribuição à montante de determinado ponto, para fins de outorga de uso da água.



Fonte: GisHidro (2000).

Figura 23 – Representação matricial de um trecho da drenagem numérica: (a) representação de seus tributários (números), pontos de deságüe dos tributários (roxo); e (b) ponto de deságüe da bacia hidrográfica na última célula vermelha do canto inferior direito.



Fonte: Rubert et al. (1999).

Figura 24 – Delimitação de bacia hidrográfica: (a) identificação automática do ponto de interesse com o cursor; e (b) Delimitação da bacia hidrográfica a montante e a jusante do ponto de interesse.

Em ambas as abordagens a exatidão do delineamento das bacias de contribuição está diretamente relacionada com a exatidão de representação da drenagem numérica. Essa questão será discutida no item 2.4.

- **Traçando o limite de uma bacia hidrográfica**

A delimitação do perímetro de uma bacia hidrográfica requer um arquivo que continha a base de dados da direção do fluxo e a criação de um novo arquivo contendo o(s) ponto(s) de partida para delimitação da bacia. Esse(s) ponto(s) de partida pode(m) ser, por exemplo, a confluência de dois rios, uma estação de tratamento de água, uma barragem, os pontos de outorga, etc.

A cada um dos pontos de interesse será assinalado um valor único inteiro positivo (1, 2, 3, ..., n) e para as demais células do arquivo, o valor -1. A base de dados de direção do fluxo é então utilizada na geração do limite de cada bacia hidrográfica, assinalando iterativamente, para cada uma das células restantes (com valor de -1), o valor da célula de cada ponto de partida para qual as demais células da bacia escoam.

- **Divisão de uma bacia hidrográfica em sub-bacias**

Algumas aplicações hidrológicas requerem a divisão de uma bacia em sub-bacias, em geral definidas pelos seus principais afluentes. As sub-bacias são consideradas como bacias, mas são classificadas como tal por fazerem parte de uma bacia maior. Para identificação das sub-bacias, em geral adotam-se os seguintes procedimentos:

1. O usuário define, como na aplicação anterior, as células de partida de cada uma das sub-bacias a ser delineada. Considerando que a divisão em sub-bacias dar-se-á com base na área mínima de drenagem, torna-se necessário definir essa área (x células), que caracterizará uma bacia. A definição dessa área depende do tipo de aplicação.

2. Em seguida, identificam-se as células de partida de cada uma das sub-bacias que atendem ao limite mínimo estabelecido.

3. Calcula-se uma base de dados intermediária denominada de diferença de fluxos para cada uma das células. O cálculo é feito ao subtrair seu valor de fluxo acumulado da célula do valor do fluxo acumulado da célula para qual ela drena (Figura 25). Os pontos de partida das sub-bacias serão todos aqueles que possuem diferença de fluxo e fluxo acumulado maior que o valor definido para a caracterização da sub-bacia (x células).

(a)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 32 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 |
| 2 | 32 | 2 | 2 | 4 | 8 | 16 | 16 | 32 | 32 | 64 | 64 | 2 |
| 3 | 32 | 2 | 2 | 4 | 8 | 32 | 16 | 32 | 32 | 64 | 64 | 2 |
| 4 | 32 | 2 | 2 | 2 | 8 | 32 | 16 | 16 | 16 | 8 | 16 | 2 |
| 5 | 32 | 2 | 2 | 2 | 4 | 8 | 32 | 16 | 16 | 16 | 16 | 2 |
| 6 | 32 | 2 | 1 | 2 | 128 | 4 | 8 | 32 | 16 | 16 | 32 | 2 |
| 7 | 32 | 1 | 1 | 1 | 2 | 128 | 8 | 32 | 32 | 32 | 32 | 2 |
| 8 | 32 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 8 | 8 | 32 | 16 | 64 | 2 |
| 9 | 32 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 8 | 32 | 16 | 16 | 2 |
| 10 | 32 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 32 | 16 | 16 | 2 |
| 11 | 32 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 128 | 4 | 32 | 16 | 2 |
| 12 | 32 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 2 |

(b)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 2 | 10 | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 2 | 21 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 5 | 35 | 3 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 2 | 2 | 6 | 44 | 4 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 3 | 62 | 11 | 6 | 2 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 64 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 10 | 76 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 3 | 90 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 95 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97 | 0 | 0 |

(c)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 8 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 19 | 11 | 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 19 | 14 | 18 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 4 | 30 | 9 | 41 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 6 | 0 | 2 | 3 | 4 | 29 | 18 | 58 | 3 | 8 | 4 | 2 | 0 |
| 7 | 0 | 2 | 1 | 4 | 2 | 41 | 2 | 51 | 5 | 4 | 2 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 64 | 12 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 6 | 3 | 66 | 14 | 86 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| 10 | 0 | 2 | 2 | 3 | 9 | 2 | 87 | 5 | 89 | 94 | 1 | 0 |
| 11 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 3 | 1 | 89 | 2 | 94 | 97 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 25 – Valores de diferença de fluxos de um MDEHC hipotético (c), calculado a partir dos arquivos de direção de escoamento (a) e de fluxo acumulado (b).

4. Assinala-se um único valor positivo para cada célula onde, simultaneamente, o valor do fluxo acumulado e o valor da diferença de fluxo sejam maiores que o valor definido pelo usuário para delimitação das sub-bacias (X células). Essas serão, como na delimitação de bacias, as células de partida de cada uma das sub-bacias a serem delimitadas. Assinale o valor -1 às outras células remanescentes.

A Figura 26 mostra o resultado da seleção automática dos pontos de partida das sub-bacias (locais de deságüe identificados por cores diferentes), onde as células possuem valor de fluxo acumulado e diferença de fluxos superiores a 10 células.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 4 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 6 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 2 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 7 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 4 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 5 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 10 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 11 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 12 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

Figura 26 – Base de dados com os pontos de partida (limiar de 10 células).

5) Delimitam-se as sub-bacias conforme o procedimento descrito para traçar os limites das bacias hidrográficas (Figura 27).

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 0 |
| 5 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 0 |
| 6 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 0 |
| 7 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 |
| 8 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 9 | 0 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 27 – Sub-bacias hidrográficas delimitadas com cores diferenciadas.

- 6) O limite da bacia ou das sub-bacias pode ser então vetorizado seguido do cálculo de sua área de drenagem neste formato ou no próprio formato *raster*.

O detalhamento da implantação computacional dessa metodologia pode ser obtido em Jenson e Domingues (1988) e Furtado, (1998). Essa metodologia é a base-padrão para a maioria dos algoritmos de análise do terreno em ambiente *raster* voltados para estudos hidrológicos, como o CRWR-PrePro, desenvolvido na Universidade do Texas. Esse algoritmo extrai, de um modelo digital de elevação, informações topográficas, topológicas e hidrológicas de um sistema hidrológico e gera um arquivo ASCII de transferência para alimentar o *Hidrologic Modelling System (HMS)*, que é um pacote de modelagem chuva X vazão (Oliveira e Maidment, 2000).

Em geral, os algoritmos de delineamento automático dos limites de bacias e sub-bacias hidrográficas disponíveis nos principais sistemas de informações geográficas requerem um elevado tempo de processamento para geração dessas informações. Esse tempo varia de acordo com a localização do ponto de interesse, sendo menor quanto mais próximo o ponto estiver da cabeceira da bacia (Djokic e Ye, 2000). Tal fato limita o uso da tecnologia, pois os usuários geralmente precisam conhecer, em tempo hábil, as bacias de contribuição em diversos pontos, segmentos de rio ou áreas de interesse. Desta forma, diversos métodos têm sido propostos para reduzir o tempo de processamento.

Djokic e Ye (2000) desenvolveram um método rápido de delineamento de bacias hidrográficas (*Fast Watershed Delineator - FWD*), com base nos seguintes pressupostos:

- As propriedades derivadas da superfície, tais como a direção de escoamento e o fluxo acumulado, só se modificam com a alteração do modelo digital de elevação – MDE, portanto estes cálculos não devem estar associados à operação de delineamento individual de cada bacia hidrográfica. Tal fato implica que esses cálculos precisam ser efetuados e salvos apenas uma única vez para cada MDE, o que possibilita o acesso direto à base de dados com o menor tempo de processamento.

- O tempo necessário para delineamento da bacia hidrográfica é função direta do número de células do MDE.

- Qualquer ponto localizado fora da área de captação da bacia hidrográfica não interfere no processo de delimitação de seus limites.

O método FWD, implementado na extensão *Watershed Delineator* do *software* ArcView, consiste de duas etapas de pré-processamento – determinação das propriedades derivadas do MDE e delineamento arbitrário inicial dos limites – e do uso de técnicas específicas desenvolvidas para delineamento individual dos limites de toda a bacia hidrográfica, para delimitação das interbacias e das bacias de contribuição à montante e à jusante de um ponto específico.

2.3.1.3. Identificação de outras variáveis fisiográficas de interesse hidrológico

As características fisiográficas ou físicas do relevo, da rede de drenagem e das bacias hidrográficas têm sido, desde a metade do século XX, a partir dos trabalhos de Horton e Strahler, largamente utilizadas em estudos geomorfológicos e de hidrologia superficial. Entretanto, a obtenção dos parâmetros que descrevem a paisagem era, até há pouco tempo, um processo demorado e trabalhoso, pois tratava-se de uma atividade estritamente manual. Desta forma, questionava-se o uso de modelos ou métodos que requeriam medidas precisas das características da superfície, pois as melhorias na eficiência do uso desses modelos não justificavam o tempo gasto para obtenção de tais parâmetros (Wang e Yin, 1997).

As características físicas⁸ de uma bacia hidrográfica são todos aqueles dados de sua superfície que podem ser extraídos de forma direta ou indireta (através de índices) de mapas e produtos de sensoriamento remoto.

⁸ As características físicas podem ser divididas em três categorias: **as relacionadas ao clima** (precipitação, radiação, temperatura, umidade, evapotranspiração, etc.); **as relacionadas aos parâmetros de escoamento** (características da rede de drenagem, área da bacia, qualidade da água etc.) e **as características relacionadas ao meio receptor** (geologia, topografia, solos, vegetação etc.). Neste trabalho o enfoque principal é para as características físicas de escoamento e do meio receptor que estão mais relacionadas com a morfologia da bacia hidrográfica. Certos autores consideram algumas dessas variáveis como fisiográficas e não físicas.

Estas características, que são dependentes da resolução dos produtos utilizados para extração dos dados, são importantes no estudo do comportamento hidrológico de uma bacia. Além disto, o estabelecimento de relações, mesmo que empíricas, entre as características físicas da bacia e os dados hidrológicos conhecidos (por exemplo, a vazão) permite, de forma indireta, a inferência de valores hidrológicos em outros locais onde sua coleta não foi possível.

O desenvolvimento de modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes e de técnicas mais precisas de extração de drenagem numérica e delimitação de bacias hidrográficas propiciou o uso dos sistemas de informações geográficas para obtenção automática de outros parâmetros necessários para a descrição da superfície terrestre, dentre os quais destacam alguns no Quadro 5.

Os parâmetros de elevação são importantes pela influência que exercem sobre a precipitação, a temperatura, as perdas de água por evaporação e transpiração e, conseqüentemente, sobre o deflúvio médio. Grandes variações na altitude estão associadas a variações significativas na temperatura e precipitação.

Dentre os parâmetros da rede de drenagem, a ordenação de um curso d'água consiste de um método que permita enquadrá-lo em uma seqüência numérica dentro de uma rede de drenagem. É uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação existente dentro de uma bacia hidrográfica. Algumas características dos rios podem ser inferidas, simplesmente, quando se conhece sua ordem, como, por exemplo, a densidade de drenagem.

Dois métodos de ordenamento têm sido utilizados. O primeiro, de uso mais comum, proposto por Strahler (1957), citados por ESRI (1996), enquadra todos os cursos d'água, independentemente da constância de escoamento, em N ordens, no sentido da cabeceira para a foz. Desta forma, os pequenos canais que não tenham tributários são considerados de primeira ordem; quando dois canais de primeira ordem se unem forma-se um de segunda ordem e a interseção de dois de segunda ordem forma um canal de terceira . Por esta lógica, dois rios de ordem N darão lugar a um rio de ordem $N + 1$; entretanto, a interseção de rios de ordens diferentes não

gera uma ordem superior, mantendo-se a codificação do de maior ordem. Tal fato torna esse método de ordenamento sensível à adição ou remoção de tributários, pois o incremento na ordem só ocorre nos casos de interseção de tributários de mesma ordem.

Quadro 5 – Parâmetros fisiográficos de interesse em estudos hidrológicos

| Tipo | Variável | Símbolo | Unidade |
|--|---|--------------------------------------|---------------------|
| Parâmetros de elevação | Elevação da bacia: mínima, máxima e média | E_{min} , E_{max} , e E_{mean} | (metro) |
| | Amplitude do relevo da bacia | $H=(E_{max} - E_{min})$ | (metro) |
| Parâmetros da rede de drenagem | Comprimento total da drenagem | L | (metro) |
| | Comprimento da drenagem principal e da bacia hidrográfica | L_d ; P | (metro) |
| | Somatório do comprimento da drenagem de primeira ordem | L_1 | (metro) |
| | Frequência da drenagem de primeira ordem | F_1 | (metro) |
| | Ordenamento | - | - |
| Parâmetros de declividade ou gradiente | Declividade da bacia: média ou máxima | S_{mean} e S_{max} | (%) |
| | Gradiente do canal – Drenagem de primeira ordem: média e máximo | $GMEAN_1$ e $Gmax_1$ | (%) |
| | Gradiente do canal - Drenagem de outras ordens: média e máximo | $GMEAN_{>1}$ e $Gmax_{>1}$ | (%) |
| | Declividade média fora dos canais de drenagem | SO_{mean} | (%) |
| Forma da bacia hidrográfica | Coefficiente de compacidade | $Kc = 0,28 \cdot P / \sqrt{A}$ | - |
| | Fator de forma | $Kf = A/L^2$ | - |
| Outros | Área de drenagem | A | (m ²) |
| | Densidade de drenagem | $D = L/A$ | (m/m ²) |
| | Razão de relevo | $R_n = H/L_m$ | - |
| | Índice de rugosidade | $R_n = D \cdot H$ | - |

Fonte: adaptado de Wang e Yin (1997).

O segundo método de ordenamento é o Shreve (1966), citado por ESRI (1996), que, no processo de ordenação, leva em conta todos os pontos de encontro da rede de drenagem. Da mesma forma que o método anterior, todos os cursos d'água externos são considerados de ordem 1. Para os cursos internos, as ordens são aditivas. Por exemplo, a interseção de dois cursos de primeira ordem cria um de segunda; a interseção de um curso de primeira com um de segunda ordem cria um de terceira, e assim sucessivamente. Este método contabiliza o número de cursos d'água que existem à montante do ponto de interesse.

Os parâmetros de declividade podem ser calculados para os canais da rede de drenagem e, ou, em relação às suas vertentes. A declividade das vertentes da bacia determina a energia do escoamento superficial. Esta característica é um dos fatores que controlam a velocidade de escoamento, afetando o tempo necessário para que a água de chuva concentre-se nos leitos fluviais e a capacidade de transporte de partículas. Com essa informação podem-se inferir, com o auxílio de outros dados, a magnitude dos picos de enchentes, o comportamento da infiltração e a suscetibilidade à erosão. É expressa em termos de porcentagem ou graus. Pode-se representar essa variável através de mapas temáticos por classe de declividade e, ou, através de curvas de distribuição de declividade. A declividade dos cursos d'água pode ser calculada por seções ou para toda a extensão do curso. Entre seções divide-se a diferença total de elevação do leito entre ambas pela extensão horizontal do curso d'água. No caso da necessidade de atribuir um único valor de declividade para todo o rio, devem-se desprezar os trechos extremos se estes apresentarem declividades muito elevadas nas cabeceiras e muito baixas nas seções de saída.

A forma superficial de uma bacia está muito relacionada com o seu tamanho e sua estrutura geológica da superfície. Sua descrição pode ser feita através de atributos qualitativos (alongada, ramificada, pêra, leque, etc.) e, ou, utilizando alguns índices de descrição quantitativa que procuram relacioná-la com uma forma geométrica conhecida, como:

- Coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius (K_c), que é dado pela razão entre o perímetro (P) e a circunferência de um círculo de área (A)

igual à da bacia ($K_c = 0,28 P/\sqrt{A}$). Este índice, que procura relacionar a forma da bacia com um círculo, é um número adimensional. Ele varia com a forma da bacia, independentemente de seu tamanho; quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o seu K_c . No mínimo, o K_c será igual à unidade, correspondendo a uma bacia circular.

- Fator de forma (K_f), que é a razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Considera-se como comprimento da bacia (L) o comprimento do curso d'água mais longo desde a foz até a cabeceira mais distante da bacia. A largura média (l) é obtida ao dividir a área da bacia (A) pelo comprimento da bacia (L). Portanto, o fator de forma pode ser obtido pela equação $K_f = A/L^2$.

A forma superficial de uma bacia hidrográfica também é importante para o relacionamento com outras variáveis, em especial com o tempo de concentração, que pode ser definido como o tempo, a partir do início da precipitação, necessário para que a água que atinge as bordas da bacia chegue até o seu ponto de descarga. A tendência para grandes cheias (grandes vazões) será mais acentuada em bacias que apresentem valores de K_c próximos de 1 e de K_f mais altos, mantendo-se outras variáveis constantes, tal como o tamanho. Por exemplo, em uma bacia estreita e longa, com um fator de forma (K_f) baixo, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a sua extensão. Além disto, as contribuições dos afluentes atingem o curso principal em diferentes locais, o que difere substancialmente de uma condição de bacia circular (K_c próximo de 1), na qual a concentração de todo o deflúvio ocorre em um único ponto.

A área de drenagem de uma bacia é a área plana (projeção horizontal) inclusa entre seus divisores topográficos. Em geral, é expressa em quilômetros quadrados ou hectares. É o elemento matemático básico utilizado no cálculo de outras características físicas. A área define primariamente a potencialidade hídrica da bacia, porque o seu valor multiplicado pela lâmina de chuva precipitada define o volume de água recebido pela bacia. De modo geral, quanto maior a área da bacia maior será a sua vazão no tributário principal. A área de drenagem topográfica dificilmente coincide com a área delimitada pelo divisor freático, que em

geral é determinada pela estrutura geológica e, em alguns casos, também sob a influência da topografia.

A densidade de drenagem fornece uma indicação da eficiência da drenagem natural da bacia e conseqüentemente da tendência para a ocorrência de cheias em uma bacia hidrográfica. Mantendo-se outros fatores constantes, quanto maior o seu índice maior a tendência de ocorrência de cheias em relação a outras bacias com menor densidade de drenagem. Tal fato ocorre devido à menor distância da precipitação que escoar sobre a superfície até os cursos d'água, bem como à maior parcela de precipitação que cai diretamente sobre os rios.

2.3.2. Extração de feições fisiográficas a partir de modelos digitais de elevação no formato TIN

Os métodos para extração de algumas de feições fisiográficas a partir da Rede Triangular Irregular – TIN encontram-se implementados nos principais softwares de sistemas de informações geográficas. Entretanto, apesar do potencial desse modelo de representação de superfície, conforme discutido no item 2.1.2.3., poucos *softwares* implementam esta solução para extração da rede de drenagem e os limites da bacia de contribuição. Detectaram-se poucos trabalhos recentes na literatura que utilizam essa abordagem de análise para delimitação de bacias hidrográficas e estudos de modelagem hidrológica de superfície. James E. Nelson et al. (www.et.byu.edu/ce/ceweb/faculty.htm) desenvolveram, na primeira metade da década de 90, diversos trabalhos nesta linha de pesquisa.

O *software* Geoterrain (*Drainage Tools*), produzido pela GEOPAK/BENTLEY (1996), dispõe de ferramentas para extração de feições hidrográficas a partir do modelo TIN. Dentre os aplicativos desenvolvidos destacam-se:

- *Create Watershed Tin* – Algoritmo de criação de um modelo TIN refinado desenvolvido para subsidiar a extração de informações fisiográficas da rede de drenagem. Na geração e no processamento do TIN avaliam-se as linhas de cumeadas, os fundos dos vales e os pontos de cota mínima, para determinar de forma mais precisa o escoamento superficial dentro dos triângulos. O algoritmo não resulta em uma nova triangulação, mas insere linhas de ruptura que representam os divisores de bacia, mantendo os triângulos internos existentes, bem como os limites dos divisores já existentes. Em analogia, este produto corresponderia ao modelo *raster* hidrologicamente consistente (MDEHC).

- *Delineate TIN Watershed* – Ferramenta desenvolvida para visualização dos limites das bacias hidrográficas no interior do TIN, a partir da definição de um ponto de cota mínima no interior ou ao longo da borda do limite do modelo .

- *Delineate Watershed* - Comando para delimitação e cálculo de área do limite da bacia de contribuição a partir da identificação pelo usuário, de um ponto de deságüe, necessariamente ao longo do fundo do vale.

- *Maximum Descent Path From Triangles* – Rotina desenvolvida para avaliar o caminho preferencial do escoamento em uma determinada região do TIN. Delimita um traçado descendente do escoamento a partir do centróide de cada triângulo contido em uma determinada região.

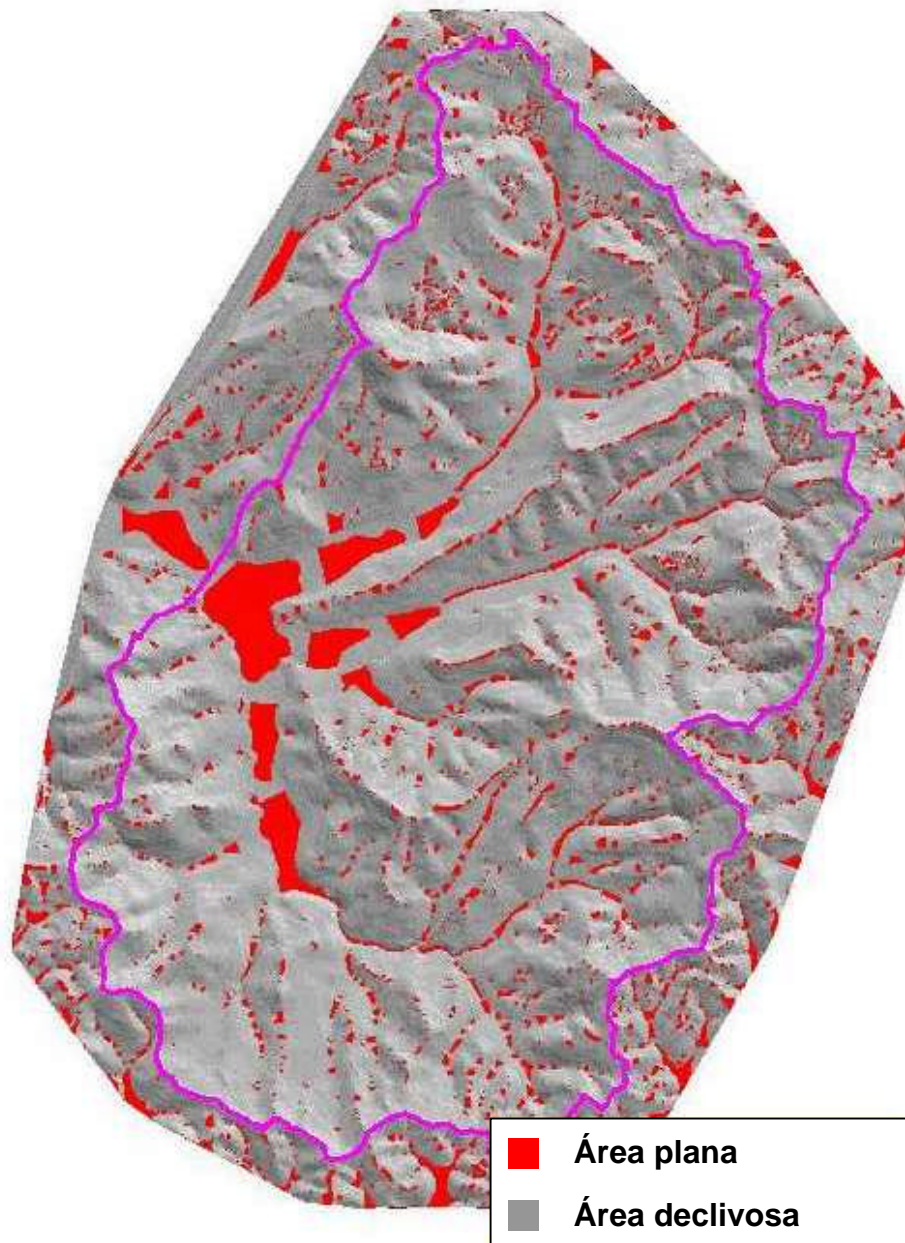
- *Delineate Sump and Ridge Lines* – Ferramentas que delimitam a drenagem numérica (bordas dos triângulos para onde convergem os escoamentos das suas faces) e a linha de cumeeira (bordas dos triângulos de onde partem os escoamentos).

- *Downstream and Upstream Trace* – Comandos que delinham, a partir da maior declividade, o caminho descendente e ascendente do escoamento a partir da indicação de um determinado ponto no TIN.

- *Delineate Flow Direction* – Rotina desenvolvida para indicar a direção do escoamento dentro de uma determinada região do TIN.

- *Delineate Low and High Points* – Programa desenvolvido para localizar os pontos de menor e maior cota, respectivamente.

Da mesma forma que no modelo de representação *raster*, no modelo TIN é também comum a formação de áreas planas decorrentes da baixa qualidade dos dados e dos processos específicos de triangulação, conforme pode ser observado na Figura 28. Esta anomalia torna imprecisa, e em alguns casos, impraticável a determinação de limites de bacias, de caminhos preferenciais de escoamento e de outras características da paisagem.



Fonte: Barbali e Omerbegovi (1999).

Figura 28 – Modelo digital de elevação TIN de uma bacia hidrográfica com o realce das áreas planas em vermelho.

Barbali e Omerbegovi, (1999) desenvolveram um algoritmo (*Arc Avenue Script*) para reconstrução da morfologia do terreno através da inserção de linhas de rupturas adicionais. Com isso, eliminaram algumas das áreas planas do TIN gerado pela extensão 3D Analyst do *software* ArcView .

2.4. Avaliação da exatidão e precisão das feições fisiográficas extraídas

Diante do aumento da disponibilidade e do uso de dados digitais de elevação, de MDEs e da capacidade dos *softwares* de processá-los (tanto em termos qualitativo quanto quantitativo), várias questões importantes têm sido levantadas pelos usuários e pesquisadores, tais como: Qual o efeito da precisão dos dados no resultado da aplicação? Qual o tamanho ideal da célula do *grid* para caracterização fisiográfica da paisagem e para estudos hidrológicos? Qual o grau de incerteza dos limites das bacias e do traçado da rede de drenagem delineados a partir de métodos automáticos? Qual o melhor modelo de dados (*raster* ou TIN) para extração de parâmetros fisiográficos? Qual ou quais os melhores e mais eficientes algoritmos? Diversas pesquisas têm sido conduzidas no sentido de elucidar algumas dessas questões, especialmente para o formato *raster* do MDE, que tem sido o mais utilizado.

Estudos conduzidos a partir de 1992 exploraram o efeito do tamanho do *grid* na representação da paisagem. Zhang e Montgomery (1994) avaliaram como o tamanho do *grid* (MDE *raster*) influencia a representação topográfica, a extração dos atributos topográficos derivados e os resultados da simulação hidrológica para duas bacias hidrográficas, utilizando, para isto, dados digitais de alta resolução. Uma das conclusões do trabalho foi a de que a célula do *grid* de 10 m seria suficiente para a maioria das aplicações em estudos geomorfológicos e de modelagem hidrológica que se baseavam em MDEs. Entretanto, Garbrecht e Martz (1996) apresentaram vários comentários a respeito deste trabalho, mostrando que a situação é bem mais complexa. Chamam a atenção para o fato de que a resolução dos dados topográficos que dão origem aos modelos digitais de elevação de diferentes resoluções contribuem de maneira expressiva para as conclusões dos estudos. Diante disto, sugerem a atenção para os seguintes aspectos:

Na teoria, o tamanho da célula do *grid*, para aplicações hidrológicas, deve considerar o tamanho da área de estudo, as características da paisagem, o tipo de modelo hidrológico (distribuído X concentrado), os parâmetros do modelo, a escala do processo que está sendo modelado e o volume de dados. Na prática, a resolução do MDE *raster* é conduzida pela disponibilidade de dados, pelo julgamento pessoal, pela experiência e pelo custo (Martz e Garbrecht, 2000).

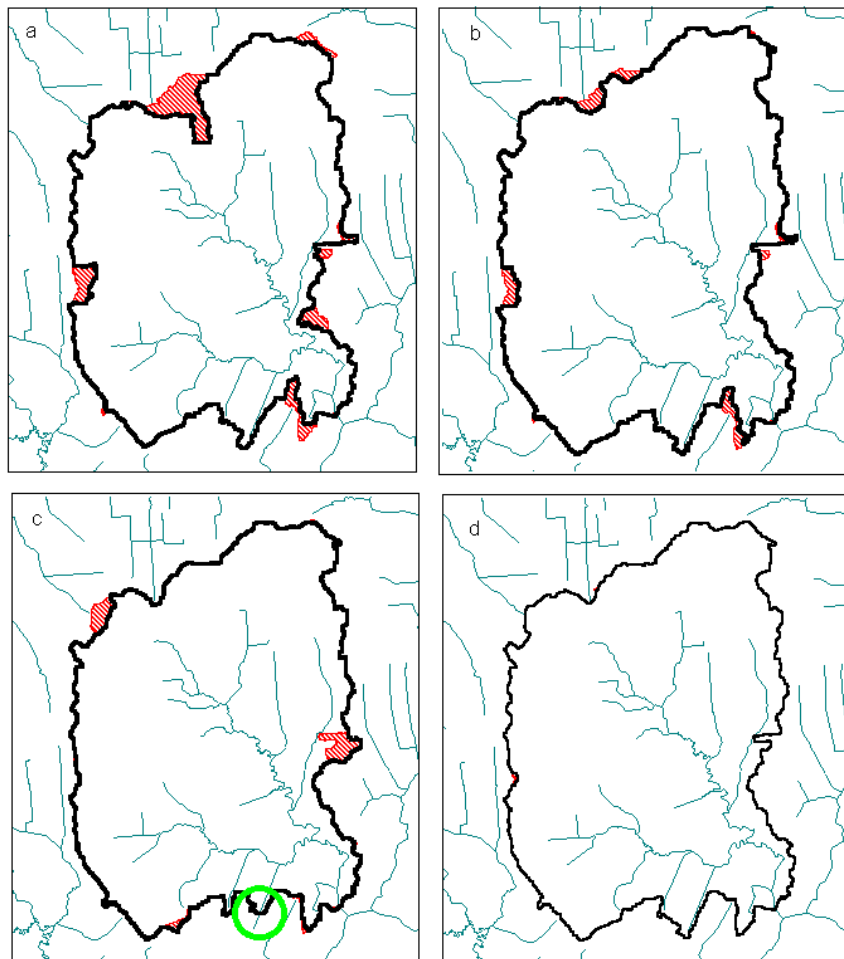
As informações contidas em um MDE não podem ultrapassar os dados de elevação que deram origem à interpolação. O MDE gerado pode ser reamostrado para resoluções menores, mas não para resoluções mais finas, pois o conteúdo da informação é o mesmo. No primeiro caso, como ocorre perda da informação, observaram-se, nos resultados do trabalho, diferenças significativas nas respostas hidrológicas para diferentes tamanhos de *grid*.

Saunders (2000) comparou quatro algoritmos desenvolvidos para extração de rede de drenagem numérica e delimitação da bacia de contribuição em duas bacias hidrográficas distintas. Os critérios para comparação foram a exatidão de representação, a formação de drenagens paralelas e o tempo de processamento. Os algoritmos utilizados foram o AGREE (Hellweger, 1997) e mais três de mesma autoria (Fillburn, Expocurv e Tribburn). Todos foram desenvolvidos na linguagem de programação do *software* ArcInfo integrando a técnica de *stream burning*, embora, segundo o autor, a técnica desenvolvida por Hellweger possa ser considerada mais como um algoritmo de refinamento de superfícies. Uma delimitação de bacias sem o uso da integração da drenagem vetorial foi utilizada como testemunha. Detalhes operacionais desses algoritmos podem ser obtidos no trabalho original. Os três algoritmos desenvolvidos pelo autor apresentam uma estrutura comum que incorpora as seguintes etapas:

- Conversão da hidrografia vetorial pré-processada para o formato matricial (*grid*).
- Processo de ajuste da hidrografia matricial para a representação da direção do escoamento com uma largura de uma única célula.
- Utilização da técnica de aprofundamento (*stream burning*).

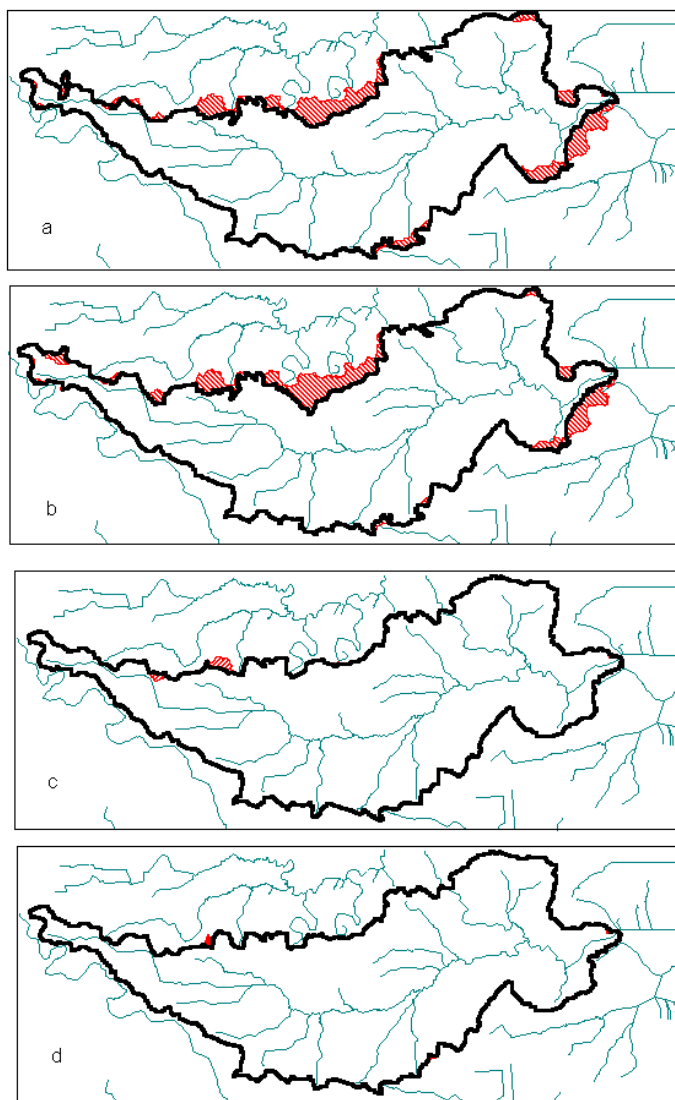
- Execução dos comandos `FILL`, `FLOWDIRECTION` e `FLOWACCUMULATION`.

Todos os algoritmos testados, com exceção do processamento-testemunha, foram considerados exatos para extração da rede de drenagem numérica, enquanto a exatidão dos resultados da delimitação das bacias hidrográficas foi bastante variada. Os algoritmos que apresentaram resultados aceitáveis quanto a esse último quesito foram o `AGREE` e o `Triburn`. Este último apresentou resultados mais exatos, porém o tempo de processamento foi de 20 a 30 vezes superior ao do primeiro. Os resultados deste trabalho estão apresentados na Figura 29.



Fonte: Saunders (2000).

Figura 29 – Rede de drenagem e delimitação automática da bacia hidrográfica de Armand pelos algoritmos (a) `Filburn.aml`; (b) `expocurv.aml`; (c) `Agree.aml`, e (d) `Triburn.aml`. Delimitação da bacia em preto itálico, distorções dos limites em vermelho e inconsistência de limites em verde. (Continua...)



Fonte: Saunders (2000).

Figura 29 (continuação) – Rede de drenagem e delimitação automática da bacia hidrográfica de Dickson pelos algoritmos (a) Filburn.aml, (b) expocurv.aml, (c) Agree.aml, e (d) Triburn.aml. Delimitação da bacia em preto *itálico*, distorções dos limites em vermelho e inconsistência de limites em verde.

Diante dos resultados obtidos, Saunders (2000) recomenda o uso da rotina Triburn nos casos em que se torna necessário apenas uma única identificação dos limites da bacia hidrográfica. Sugere ainda o desenvolvimento de novas pesquisas que avaliem precisão e eficiência de processamento, além do desenvolvimento de técnicas automáticas de pré-processamento da drenagem vetorial, uma vez que o processo de edição convencional requer um esforço intensivo.

Entretanto, as rotinas testadas por Saunders (2000) não estão disponíveis nas versões comerciais dos principais *softwares* de sistemas de informações geográficas comercializados no Brasil. Na revisão bibliográfica realizada detectaram-se dois trabalhos que tratam da comparação de rotinas disponíveis em *softwares* comerciais e de domínio público (Furtado, 1998; Perez, 2000).

Furtado (1998) fez, para uma área-teste no norte do Estado de Minas Gerais, uma comparação visual entre a rede de drenagem extraída das bases cartográficas do IBGE (1:100.000) e a drenagem derivada do modelo digital de elevação a partir dos *softwares* ArcInfo v.7. 0 e Spring v. 2.0.5. A rede de drenagem gerada pelo Spring apresentou grandes divergências quando comparada à hidrografia original, principalmente nas áreas mais planas da carta topográfica. Por outro lado, a drenagem gerada pelo módulo Topogrid do ArcInfo foi muito semelhante à drenagem original. Apesar de a autora não ter quantificado os erros e acertos, ficou evidente que os resultados são bastante sensíveis ao *software* utilizado na geração do MDE. Devido à capacidade computacional exigida pelo Spring, a autora desaconselha o uso desse *software* em projetos que envolvam grandes áreas.

Perez (2000) comparou os métodos de delineamento automático de bacias disponíveis nos *softwares* ArcInfo (AMLs do módulo GRID) e ArcView (extensão Watershed Delineator) no que se refere às funcionalidades e ao tempo de processamento em diferentes plataformas de *hardware*. A extensão *Watershed Delineator* apresentou uma interface mais amigável e uma maior disponibilidade de funções, embora a documentação pobre e a ausência de um tutorial tenham sido detectadas.

A exatidão de representação digital da rede de drenagem e do limite das bacias é efetuada, na maioria das vezes, através da comparação visual com as informações contidas nas cartas planialtimétricas disponíveis. A comparação com a rede de drenagem mapeada é relativamente fácil, pois é uma feição facilmente observável, enquanto os limites das bacias precisam ser extraídos por especialistas a partir da análise de curvas de nível e estão sujeitos a erros de interpolação e interpretação. A literatura consultada reporta erros desprezíveis no que diz respeito à representação da drenagem e na faixa de até 15% da área de bacias hidrográficas, quando se utiliza o modelo *raster* de representação.

Barbali e Omerbegovi (1999) reportaram diferenças de áreas menores do que 1% e de perímetros menores do que 6% a partir de um TIN corrigido para áreas planas. A base de comparação utilizada, neste último caso, foi extraída de mapas topográficos e fotografias aéreas. Não foi detectada na literatura consultada a comparação do uso de algoritmos implementados a partir da estrutura *raster* e TIN, para uma mesma área geográfica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área de estudo

A área de estudo, com cerca de 18.408 km² (Figura 30), corresponde à carta topográfica do IBGE Rio Preto do Igapó-Açu (SB-20-X-B MIR-139), escala 1:250.000, e está localizada entre os paralelos de 4º e 5º de latitude sul e entre os meridianos 60º e 61º de longitude WGr.

No contexto geomorfológico, insere-se na unidade de relevo – planalto rebaixado da Amazônia Ocidental (RADAM, 1978) – cuja denominação foi, posteriormente, alterada pelo IBGE (1993) para Depressão Acre-Solimões.

Essa unidade de relevo caracteriza-se por uma superfície plana situada entre os principais rios e por interflúvios tabulares que são formados pelo aprofundamento da drenagem nessa superfície. Esses interflúvios ocorrem bordejando os rios Tupana, Preto do Igapó-Açu, Anãs-Mirim e Madeira. Ambas as formas do relevo – superfície aplainada e interflúvios tabulares – apresentam cotas de topo entre 50 e 90 m e uma suave inclinação do sul para o norte. O encaixamento da drenagem existente é considerado de muito fraco a fraco e observa-se a ocorrência de trechos de planícies fluviais com depósitos aluvionares expressivos ao longo dos rios Tupana e Luna – afluentes do rio Preto do Igapó-Açu e do rio Madeira.

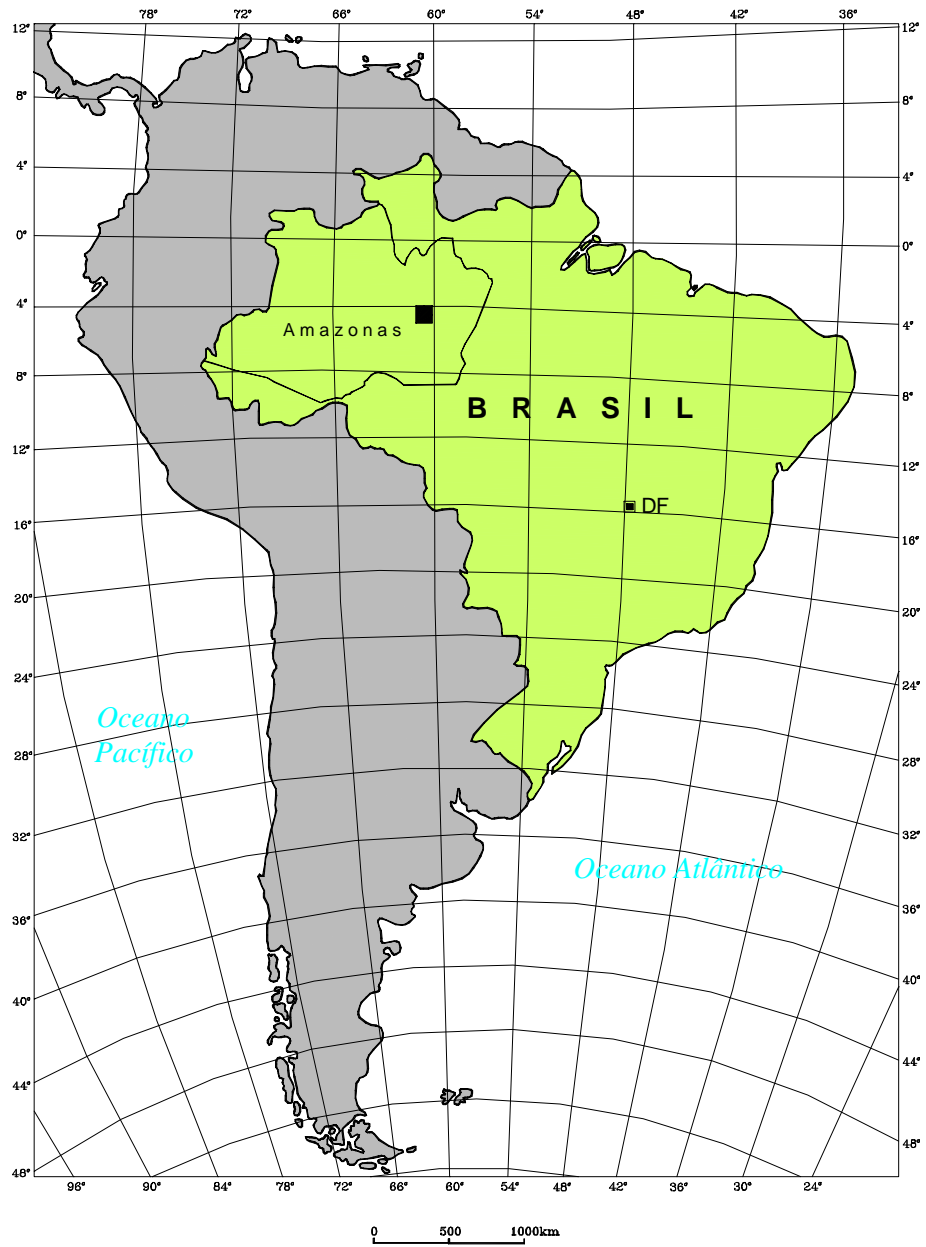


Figura 30 – Localização da área de estudo.

A história geológica da área, a partir do Terciário Superior, relata a deposição da Formação Solimões por processos fluviais e lacustres durante o Pleistoceno Médio ao Pleistoceno Superior, constituindo todo o substrato da área. Posteriormente, durante fases mais secas do Pleistoceno Superior, processos de pediplanação truncaram o topo da Formação Solimões, depositando areias e elaborando uma superfície de aplainamento denominada Pediplano Neopleistocênico. No Holoceno ocorreu o encaixamento da drenagem na superfície e a construção das planícies fluviais que integram a grande unidade da Planície Amazônica.

A escolha dessa área para teste da metodologia proposta deu-se, principalmente, em função do relevo plano e da escassez e baixa qualidade dos dados altimétricos, o que reflete a situação atual da maior parte do mapeamento sistemático da Amazônia Legal. Contribuiu também para a escolha do fato de a área não apresentar ocupação humana significativa, estando predominantemente coberta pela floresta tropical densa (RADAM, 1978).

3.2. Dados e materiais utilizados

A drenagem e os dados altimétricos primários da carta topográfica do IBGE – curvas de nível e pontos cotados –, utilizados para geração dos modelos digitais de elevação, foram disponibilizados pelo IBGE no formato digital. Nesse arquivo foram identificados apenas uma curva de nível ao longo da calha dos principais afluentes, com cota aproximada de 50 m, e 163 pontos cotados dispersos pela área da carta, com as altitudes variando entre 39 e 91m (média de 62,44 m, variância de 92,57 m e desvio-padrão de 9,62 m).

A imagem multiespectral de satélite, órbita ponto 231-063, foi obtida pelo sensor ETM+/Landsat-7 em 26/11/1999. Esse produto foi utilizado para verificação do uso atual das terras e validação da rede de drenagem cartografada na folha rio Preto do Igapó-Açu.

Os *softwares* utilizados para tratamento dos dados, criação dos modelos digitais de elevação e geração de informações morfométricas de bacias hidrográficas de interesse multidisciplinar, foram o Sistema de

Informações Geográficas ArcInfo, versão 7.2.1 – NT, e o Sistema de Processamento de Imagens ERDAS IMAGINE, versão 8.2. Utilizaram-se também algumas rotinas em *Arc Macro Language* (aml) implementadas pela equipe do Laboratório de Geomática do Projeto SIF/SIVAM. Para a visualização, análise e impressão dos resultados, utilizou-se o *software* ArcView v.3.2a.

3.3. Abordagem metodológica proposta

3.3.1. Sensoriamento remoto

A metodologia utilizada para o processamento digital da imagem de satélite consistiu dos seguintes procedimentos:

- Aquisição, leitura e importação das bandas 3, 4, 5 e a pancromática para o formato do *Erdas Imagine* (*.img).
- Geração do arquivo *multilayer* 3, 4, 5, com resolução espacial de 30 m.
- Georreferenciamento do arquivo anterior e da banda pan, com resolução de 15 m, a partir das coordenadas da imagem fornecidas pelo distribuidor (nível 1G).
- Geração da imagem *merge* com resolução de 15 m utilizando o método multiplicativo e a técnica de reamostragem por convolução cúbica (Erdas, 1985).
- Reprojeção da imagem *merge* para o sistema de projeção Albers, esferóide: Internacional 1909, Datum: Sad 69.
- Novo georreferenciamento da imagem (RMS de 30 m) a partir de pontos de controle coletados do arquivo vetorial da drenagem digital do IBGE (nível GCP).
- Corte da imagem utilizando o polígono cuja área corresponde à carta topográfica do rio Preto do Igapó-Açu.

3.3.2. Sistema de informações geográficas

A metodologia utilizada para geração e validação do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente – MDEHC, a partir do uso do módulo TOPOGRID do *software* ArcInfo e de outras funções desse sistema de informações, foi concebida para ser executada em cinco etapas, a saber:

1) Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem para uso do TOPOGRID.

2) Geração do Modelo Digital de Elevação – MDE com o uso do TOPOGRID.

3) Pós-Processamento para geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente – MDEHC e do seu grid de direção de escoamento.

4) Extração automática de variáveis morfométricas do relevo de interesse multidisciplinar a partir de rotinas específicas do *software* ArcInfo aplicadas sobre o MDE gerado pelo TOPOGRID e sobre o MDEHC.

5) Validação da metodologia proposta e aplicabilidade do produto.

3.3.2.1. Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem para uso do TOPOGRID

A grande maioria dos softwares que geram modelos digitais de elevação necessita que os dados digitais de entrada estejam consistidos e com uma qualidade e estrutura mínima aceitável. O TOPOGRID também requer, para a utilização de toda sua potencialidade, a geração de arquivos individuais contendo os limites da área de trabalho, os pontos de identificação dos sumidouros naturais da drenagem, a hidrografia digital conectada, simplificada e orientada no sentido do escoamento superficial, o contorno dos lagos e os dados de altimetria discriminados em curvas de nível e pontos cotados.

Dessa forma, os procedimentos adotados nessa etapa visaram à preparação dos arquivos digitais, que na estrutura do ArcInfo são denominados de *coverages* ou pastas. Para isso foram realizadas operações manuais e automáticas, sendo estas últimas através da implementação de

rotinas para otimização dos processos. O fluxograma metodológico, apresentado na Figura 31, mostra a seqüência e as relações de cada um dos procedimentos adotados.

A primeira fase desta etapa foi a aquisição dos dados digitais. Os dados de altimetria e de hidrografia disponibilizados pelo IBGE, já no formato *digital microstation* (*.dgn), foram convertidos através do procedimento de importação para o formato do ArcInfo. Esses dados foram avaliados quanto à sua consistência (área de cobertura, coordenadas, sistema de projeção, conectividade das feições de linhas, coerência dos valores de elevação), e editados, quando necessário. Posteriormente, esses dados foram projetados para o sistema Albers, esferóide: Internacional 1909, Datum: Sad 69, sendo então construídas as relações topológicas das feições.

A etapa seguinte consistiu na preparação individual dos dados digitais de altimetria e hidrografia para serem utilizados no TOPOGRID.

A representação espacial da rede hidrográfica foi desmembrada e simplificada, conforme apresentado na Figura 31, gerando pastas individualizadas de pontos (sumidouros naturais), arcos (rios, ilhas e lagoas) e polígonos (lagos). Para geração da linha central das lagoas e de rios duplos criaram-se polígonos de Thiessen a partir de nós adicionados ao longo dos polígonos que compõem essas feições.

A pasta de arcos simples dos componentes da hidrografia gerada foi então processada, através da rotina *dirarc_auto.aml*. Essa rotina utiliza a estrutura topológica interna dos arcos, de forma a obter a orientação dessas feições para o sentido do escoamento. Posteriormente, desenvolveram-se procedimentos para permitir a validação visual dos resultados da rotina, de modo a assegurar a convergência de todos os arcos para a seção de deságüe.

Em relação à altimetria, as isolinhas, devido à presença de facetadas, decorrente do processo de captura via mesa digitalizadora, ou a inconsistências provenientes do processo de restituição, foram visualmente ajustadas à hidrografia orientada e simplificada.

Por fim, os pontos cotados, as isolinhas e a rede hidrográfica foram visualmente analisados de forma integrada, com o auxílio da imagem de satélite recortada nível GCP, de forma a verificar a existência de erros

ETAPA 1 - Pré-Processamento dos dados digitais para uso do TOPOGRID

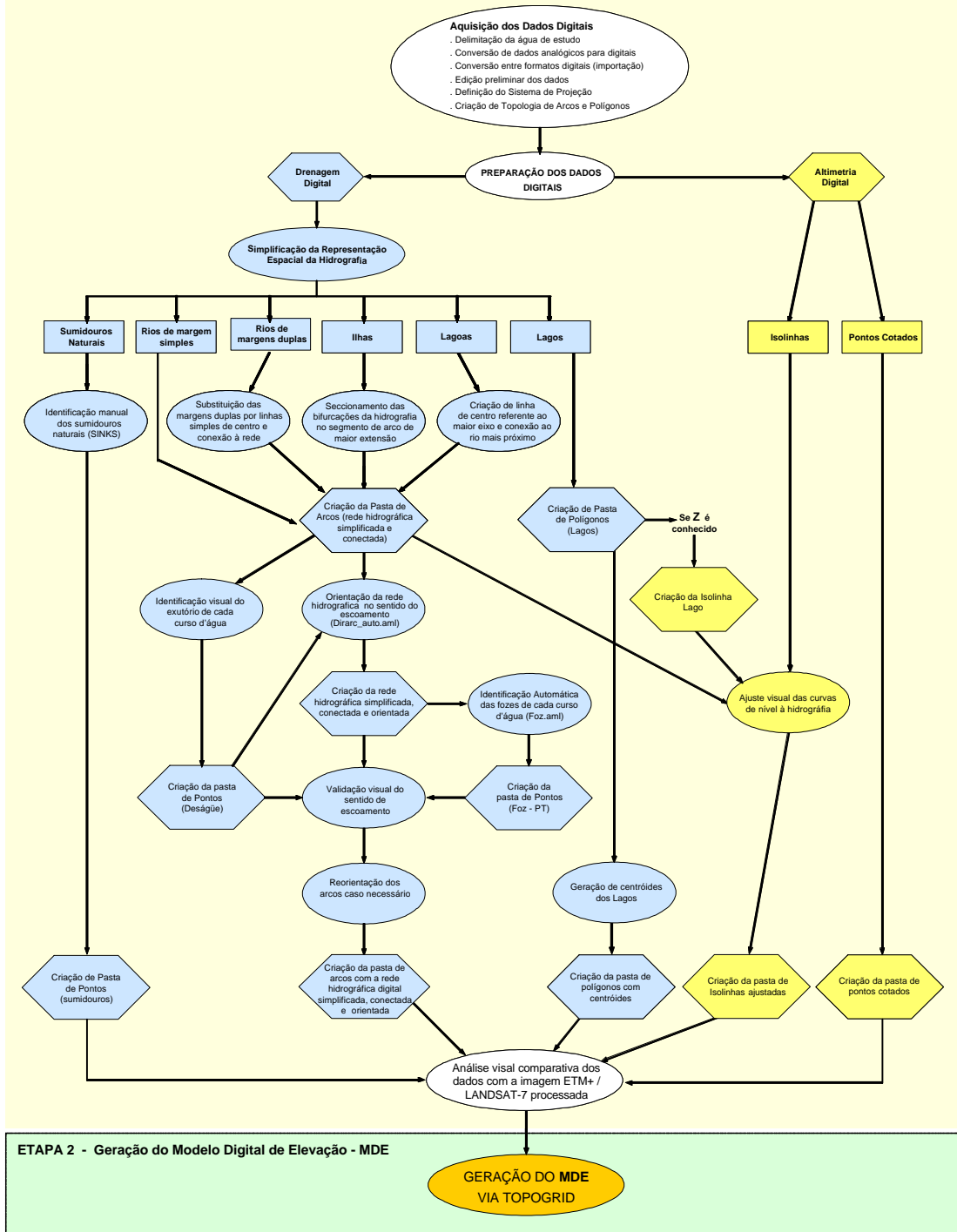


Figura 31 – Geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) – Etapas 1 e 2.

grosseiros da representação da drenagem ou a incoerência de valores altimétricos.

3.3.2.2. Geração do Modelo Digital de Elevação – MDE com o uso do TOPOGRID

Uma vez produzidos os arquivos de entrada, tornou-se necessária a definição de parâmetros técnicos que controlaram o processo de geração do MDE via TOPOGRID.

O método de interpolação desse programa utiliza técnicas iterativas de diferenças finitas e é otimizado para ter a eficiência computacional dos interpoladores locais, sem perder a continuidade da superfície proporcionada pelos interpoladores globais (ESRI, 1986). Os principais parâmetros técnicos utilizados pelo TOPOGRID para geração do modelo digital de elevação da área-teste, com seus respectivos valores adotados para avaliação da metodologia proposta, foram:

1) Resolução: 30 metros.

2) Tipo de dados de entrada.

Definem os dados de entrada para a geração do modelo que podem ser as pastas de linha (curvas de nível e drenagem), pastas de ponto (pontos cotados e sumidouros) e as pastas de polígonos (limite da região de interpolação e do contorno dos lagos).

3) Parâmetros de controle

- Tipo de dado de elevação (Data Type: < Contour / SPOT >):

Define a fonte primária de dados de altimetria mais confiável e que será utilizada para otimizar o método de pesquisa empregado durante a geração da drenagem e das linhas de cumeada numéricas. No caso da área-teste, os pontos cotados (SPOT) são mais confiáveis, pois as curvas de nível da base cartográfica são escassas, restritas às calhas dos rios e

aproximadas, uma vez que foram traçadas sobre as copas das árvores (IBGE, 1982).

- Imposição da drenagem (Enforce: < ON / OFF >):

Define se os dados de drenagem serão ou não impostos durante o processo de interpolação para geração do modelo digital de elevação, de forma a tentar garantir a sua consistência hidrológica. Se a opção estiver habilitada (*default*) o programa buscará, através da remoção das falsas depressões (SINKS), respeitar o traçado da hidrografia mapeada nos casos em que não ocorra a violação das condições de altimetria. O programa assume que todos os sumidouros naturais não-identificados são erros decorrentes do processo de interpolação, pois tais feições são raras nas paisagens naturais (exceto na região do KARST). No caso da área-teste, habilitou-se essa opção.

- Número de iterações (Iterations < Value >):

Define o número máximo de interações para cada nível de resolução (*default* e valor utilizado foi 30). O TOPOGRID utiliza o método de interpolação de múltiplas resoluções, iniciando com resoluções mais grosseiras até resoluções mais finas, definidas pelo número de interações.

A cada interação as condições de drenagem são impostas, a interpolação é executada e o número de depressões remanescentes é registrado em um arquivo de diagnóstico. Valores entre 35 e 40 podem ser utilizados para remover a maior quantidade de depressões espúrias.

- Ajuste das tolerâncias (*Tolerances* {tol1} {horizontal_std_err} {vertical_std_err})

São três parâmetros utilizados para ajustar a suavização dos dados de entrada e a remoção das depressões espúrias no processo de imposição da drenagem.

Tol1<valor>: Essa tolerância reflete a exatidão e a densidade dos pontos cotados. Dados que bloquearem a drenagem dentro dessa tolerância

serão removidos. No caso de as curvas de nível serem a fonte de dados mais confiável, o valor dessa variável deverá ser fixado na metade da equidistância das curvas de nível. O valor *default* é 2,5 e, se os dados altimétricos forem muito esparsos, a tolerância poderá ser aumentada, produzindo um MDE mais generalizado. Para pontos cotados, os valores de Tol1 recomendados para a cartografia americana, em função da escala dos mapas, são: 2,5 (1:50.000); 5 (1:100.000) e 10 (1:500.000).

`Horizontal_std_err <valor>`: Esse parâmetro representa a quantidade de erro inerente ao processo de conversão dos dados de elevação, representados por pontos, linhas e polígonos, para um *grid* regularmente espaçado. O programa ajusta seu valor em função da declividade local de cada ponto e do tamanho da célula. O valor de *default* é 1 e a faixa recomendada situa-se entre 0,5 e 2. Valores maiores produzirão maior suavização do modelo, enquanto valores menores produzirão modelos menos suavizados e, portanto, mais propensos à existência de mais picos e depressões espúrias.

`Vertical_std_err <valor>`: Parâmetro que representa a quantidade de erro aleatório presente nos dados de entrada. Para a maioria dos conjuntos de dados de elevação, esse valor deve ser fixado em zero (*default*). Se os erros aleatórios dos dados de elevação forem significativos, com variância uniforme, o desvio padrão dos erros deverá ser utilizado como valor para esse parâmetro.

De acordo com o manual do programa, os valores *default* para os dois últimos parâmetros são muito robustos, tendo sido testados para uma grande variedade de fonte de dados. Recomenda-se a alteração desses valores apenas no caso de os resultados da interpolação não apresentarem valores satisfatórios. Entretanto, antes de se proceder a alguma alteração deve-se, primeiramente, proceder à análise minuciosa dos dados de entrada em busca de erros que poderiam ter influenciado negativamente o processo. Desta forma, os valores *default* desses dois parâmetros foram mantidos neste trabalho e os valores de Tol1 adotados (mantendo-se todos os outros parâmetros do interpolador constantes) foram 2,5 e 7,5. Testes preliminares foram realizados com esses dois valores, e os modelos de elevação gerados não apresentaram diferenças expressivas nos seus valores altimétricos.

Assim, manteve-se o valor default de 2,5.

- Limites da área e dos valores de interpolação.

Para que sejam obtidos melhores resultados de interpolação ao longo das bordas do MDE, o conjunto dos limites X e Y do modelo a ser gerado deve ser menor do que a extensão dos dados de entrada em pelo menos dez células de cada lado do menor retângulo envolvente (ESRI, 1996).

Adotaram-se, neste estudo, os valores *default* do programa que estabelecem, para X e Y, os limites mínimo e máximo para todas as fontes de dados. Para os dados de elevação (Z) o programa considera a faixa de 20% inferior e superior aos valores mínimos e máximos observados no conjunto de dados.

A eliminação dos efeitos de borda na área-teste foi conseguida através da eliminação de uma faixa interna de 1 km ao longo de todo o perímetro do MDE. Adotou-se esse procedimento também para eliminar dados inconsistentes da drenagem digital observados na borda leste da carta topográfica do IBGE.

4) Saídas opcionais

Além do modelo digital de elevação – MDE, foram gerados também, a partir do TOPOGRID, três arquivos opcionais. A primeira pasta contém as depressões não eliminadas ao final da interpolação (SINKS). A segunda pasta contém a hidrografia e as linhas de cumeada criadas no início do processo de interpolação. O terceiro arquivo de diagnóstico apresenta, em formato texto, a listagem das entradas e dos parâmetros utilizados, além do número de depressões eliminadas a cada iteração e o número existente ao final do processo.

3.3.2.3. Pós-processamento para geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente – MDEHC

Esta etapa visou eliminar as depressões espúrias remanescentes no MDE gerado na etapa anterior, garantindo a consistência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem numérica. Buscou-se também garantir a coincidência espacial da drenagem numérica do modelo com a drenagem vetorial digital compilada das bases cartográficas. Para isto foram utilizados diversos comandos implementados no ArcInfo, além da técnica de refinamento de superfícies e de *stream burning*. O método proposto para essa etapa é apresentado na Figura 32, que mostra a seqüência e as relações entre os procedimentos adotados.

Os dados necessários para o pós-processamento foram o modelo digital de elevação – MDE gerado pelo TOPOGRID e a pasta de drenagem simplificada, conectada e orientada no sentido do escoamento.

A primeira fase dessa etapa consistiu na aplicação da técnica de *stream burning*, de forma a garantir a coincidência espacial da drenagem numérica com a drenagem vetorial. Para isso a drenagem vetorial foi transformada para o formato *raster* com espessura de uma célula (30 m), através de comandos específicos do *software* ArcInfo. Posteriormente, promoveu-se um rebaixamento constante de 1.000 m nos valores da altimetria das células que compõem a hidrografia rasterizada e a sua incorporação ao modelo digital de elevação – MDE, através da substituição dos valores originais.

A segunda etapa consistiu da eliminação das depressões espúrias que não foram removidas durante a geração do modelo digital de elevação via TOPOGRID e aquelas introduzidas durante o processo de imposição da drenagem. Para isso utilizou-se o comando FILL do ArcInfo. Em seguida restauraram-se os valores originais da altimetria ao longo da drenagem aprofundada, eliminaram-se os picos espúrios e procedeu-se à conversão de unidades altimétricas do modelo.

A aplicação isolada da técnica de *stream burning* e a das técnicas propostas na segunda fase do pós-processamento não garantem a caracterização de um TALVEGUE ao longo das células que compõem o

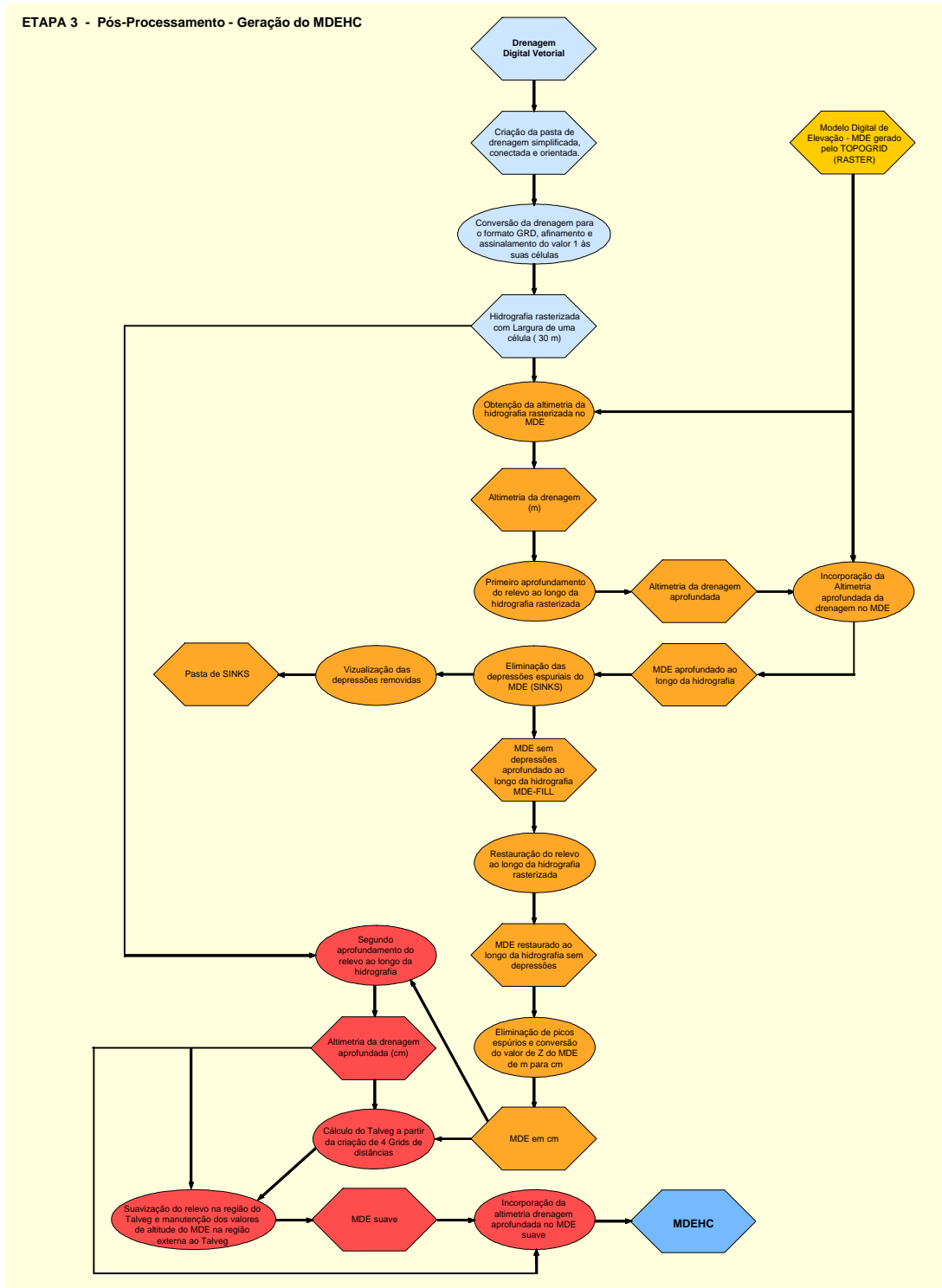


Figura 32 – Geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) – Etapa 3.

traçado da hidrografia imposta. Em determinados trechos, onde a topografia não esteja devidamente caracterizada, a hidrografia poderá estar situada ao longo de encostas. Em geral tal fato ocorre nos casos em que a drenagem vetorial diverge consideravelmente da drenagem numérica. Isto faz com que a direção de escoamento das células adjacentes ao traçado da hidrografia apresente direção de escoamento divergente do fluxo natural, o que manteria a inconsistência hidrológica do MDE.

Para solução desse tipo de problema, utilizou-se, em uma terceira etapa de processamento, a técnica de refinamento de superfície implementada através da criação de quatro *grids* intermediários. A partir desses *grids* construiu-se o TALVEGUE ao longo de toda a drenagem, em uma extensão lateral de cinco células, seguido de um aprofundamento arbitrário de 2 m nas células correspondentes à drenagem vetorial. Esse procedimento, ilustrado na Figura 33 garante, na maioria dos casos, a consistência hidrológica do escoamento superficial para a calha do MDEHC.

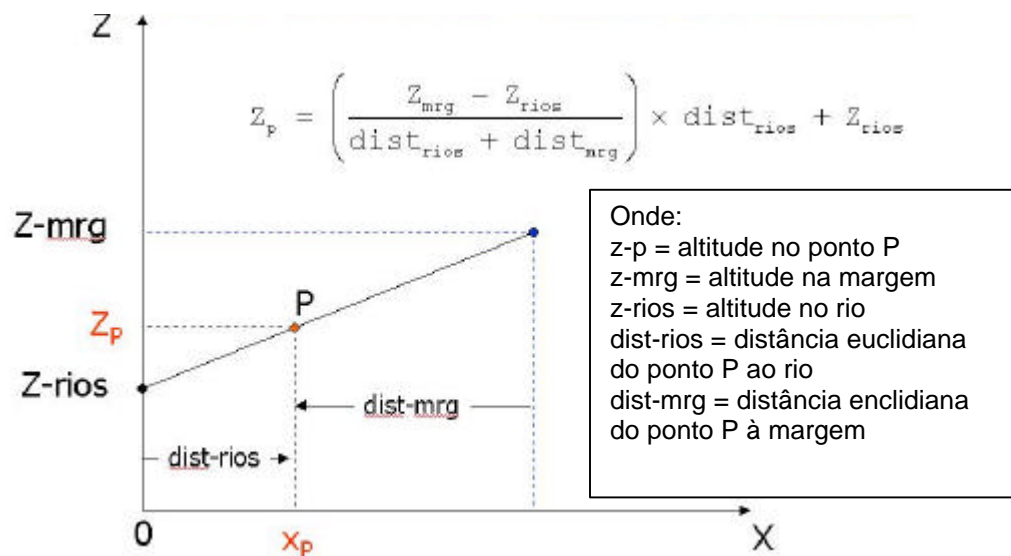


Figura 33 – Processo matemático de criação do TALVEGUE.

Infelizmente esses últimos procedimentos introduziram novas depressões espúrias ao longo da drenagem rasterizada. Além disto, em regiões de extensas planícies aluviais e com baixa densidade amostral de pontos altimétricos – como é o caso da área-teste –, a declividade ao longo da hidrografia e de suas margens pode ser nula. Esta ilustração gera uma indefinição da direção de escoamento das células da hidrografia do *grid* correspondente. Tais anomalias presentes no MDEHC, mais uma vez, poderão causar a descontinuidade do escoamento superficial do *grid* específico. Isso inviabiliza a correta delimitação automática da bacia de contribuição a partir dessas áreas ou de outras variáveis hidrológicas de interesse obtidas a partir de comandos específicos do ArcInfo.

A solução desse problema no MDEHC, dentro da região do TALVEGUE, poderia ser implementada através da repetição dos procedimentos de pós-processamento. Entretanto, como esse processo demanda elevado tempo de processamento, optou-se pela manutenção dessas pequenas inconsistências locais e a adoção de uma solução baseada no pós-processamento do *grid* da direção de escoamento.

A metodologia de pós-processamento impõe a direção de escoamento das células que compõem uma margem ao longo da drenagem rasterizada para a foz da rede hidrográfica. As células ao longo da hidrografia numérica foram direcionadas para a foz, e as demais células dentro dessa margem foram direcionadas para a hidrografia numérica. Para tanto utilizou-se o conceito da distância euclidiana, implementada através de comandos específicos do ArcInfo que traçam o menor caminho de uma célula contida no talvegue até o exutório da bacia.

Os seguintes procedimentos foram adotados para geração da pasta da direção de escoamento corrigida do MDEHC:

- Identificação das células associadas ao exutório da rede de drenagem (pasta de pontos contendo as fozes dos tributários geradas pela rotina foz.aml)
- Conversão da pasta de pontos para o formato GRID.
- Coincidência espacial da célula *grid* de cada foz com a respectiva representação vetorial.

- Geração e imposição, na região do TALVEGUE, do sentido de escoamento das células da hidrografia rasterizada para a foz e ao longo dos taludes para a hidrografia, através do comando COSTBACKLINK e de técnicas de operações matriciais.

3.3.2.4. Validação da metodologia proposta e aplicabilidade do produto

Todo modelo digital de elevação, seja ele hidrologicamente consistente ou não, deve ser avaliado para certificar-se de que os dados, o próprio método e seus parâmetros sejam capazes de gerar uma representação realística da paisagem. Essa representação é limitada pela qualidade e quantidade dos dados altimétricos e pela eficiência dos interpoladores.

Existem várias formas de avaliar qualitativa e quantitativamente o modelo gerado, dependendo do tipo de dado utilizado para sua criação. Os resultados das avaliações auxiliam na identificação de erros nos dados e, ou, nos processos de interpolação.

O método qualitativo mais utilizado para avaliação da exatidão da representação altimétrica do MDE consiste na criação de curvas de nível a partir do modelo e sua comparação com as isolinhas utilizadas. Recomenda-se que esses novos contornos tenham a metade da equidistância entre as curvas originais para facilitar a análise (ESRI, 1996).

Outro método consiste na separação de uma parte dos dados de entrada (pontos cotados) utilizados na interpolação. Após a geração da superfície, a altitude desse conjunto de dados isolados pode ser comparada com os valores correspondentes no modelo gerado. As diferenças podem ser utilizadas na medição do erro da superfície, tal como o RMSE.

Em decorrência da escassez de isolinhas (uma isolinha) e da pouca representatividade dos pontos cotados (cerca de 1 ponto para cada 112 km²) na área de estudo esses dois métodos não foram utilizados.

Um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente – MDEHC, além da representação realística da paisagem, deve também descrever, com exatidão, o caminho do escoamento superficial.

Uma forma de verificar tal fato é através da visualização do trajeto de escoamento superficial ao longo do modelo. Outras formas são através da comparação visual da drenagem numérica matricial gerada com a drenagem vetorial e, ou, através da delimitação das bacias hidrográficas de contribuição à montante de pontos escolhidos de forma aleatória. No primeiro caso, a coincidência espacial dessas duas feições é um parâmetro qualitativo de verificação da consistência hidrológica do modelo, pelo menos no que diz respeito à representação espacial da drenagem. Esses foram os métodos utilizados para validação da metodologia proposta para a criação do MDEHC em relação a sua criação exclusivamente com o uso do programa TOPOGRID do ArcInfo.

A utilização do MDE gerado pelo TOPOGRID e pelo MDEHC para subsidiar a caracterização do escoamento superficial e a extração de variáveis morfométricas de interesse multidisciplinar requer que a informação de altimetria seja complementada, para cada célula do modelo, com o cálculo da direção de escoamento e do fluxo acumulado. Essas duas informações podem ser obtidas para cada um dos modelos pela aplicação direta de comandos disponíveis no módulo *grid* do software ArcInfo, respectivamente, o Flowdirection e o Flowaccumulation.

1) Cálculo da direção de escoamento

A direção do escoamento descreve e espacializa o sentido do fluxo entre cada célula do MDE e de suas oito células vizinhas (modelo D8 de representação). O escoamento se dá em direção ao maior declive, recebendo um dos possíveis valores, conforme apresentado na Figura 14. O cálculo foi realizado para cada um dos dois modelos – MDE e MDEHC.

2) Cálculo do fluxo acumulado

A partir da pasta de direção de escoamento do MDE e da direção do escoamento corrigido do MDEHC procederam-se, para cada um dos modelos, o cálculo e a geração do *grid* do fluxo acumulado. Esse *grid* define o número de células que drenam para a célula considerada. O número varia

de zero, para os divisores de água, a até valores mais elevados ao longo do curso d'água, aumentando em direção à foz. Uma vez que se conhece o tamanho da célula (30 m), obtém-se diretamente a área de drenagem de um ponto qualquer definido na superfície do MDEHC.

3) Delineamento da rede de drenagem e das bacias hidrográficas

O delineamento da rede de drenagem e dos limites geográficos das bacias hidrográficas foi realizado, para cada um dos dois modelos, a partir do uso dos comandos STREAMLINE e BASIN do ARC/INFO.

A drenagem é derivada a partir dos *grids* de direção de escoamento e do fluxo acumulado, sendo o valor do limiar inferior adotado para o mapeamento de 2.000 células. Para aumentar a densidade da rede de drenagem, basta diminuir o valor mínimo do fluxo acumulado necessário para sua geração.

Os limites das bacias hidrográficas são estabelecidos a partir dos divisores de água com base no arquivo da direção do escoamento. A fundamentação teórica do algoritmo é apresentada na revisão bibliográfica da pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem

A preparação dos dados digitais de elevação e de drenagem consistiu na etapa mais laboriosa da metodologia proposta para geração do modelo digital de elevação hidrológicamente consistente – MDEHC. Tal fato não difere da maioria dos trabalhos na área de geoprocessamento, onde a elaboração e a consistência da base de dados consome a maior parte das horas previstas para a execução dos trabalhos. Os principais resultados obtidos nessa etapa estão apresentados a seguir:

A Figura 34 mostra o resultado da simplificação da representação da hidrografia de um trecho de rio com margem dupla e com a presença de ilhas. Observa-se a substituição dos rios de margem dupla por linhas simples de centro e sua conexão à rede hidrográfica de arcos simples. No caso das ilhas, observa-se o seccionamento da hidrografia no segmento de arco de maior extensão.

A Figura 35 apresenta, para um trecho da drenagem, o resultado do processo de orientação da hidrografia conectada e simplificada para a direção da foz. Observa-se que a rede de drenagem original do IBGE apresenta, em alguns trechos, a inversão do sentido de escoamento. Tal fato é decorrente da forma aleatória empregada no processo de digitalização dos arcos que compõem a drenagem.

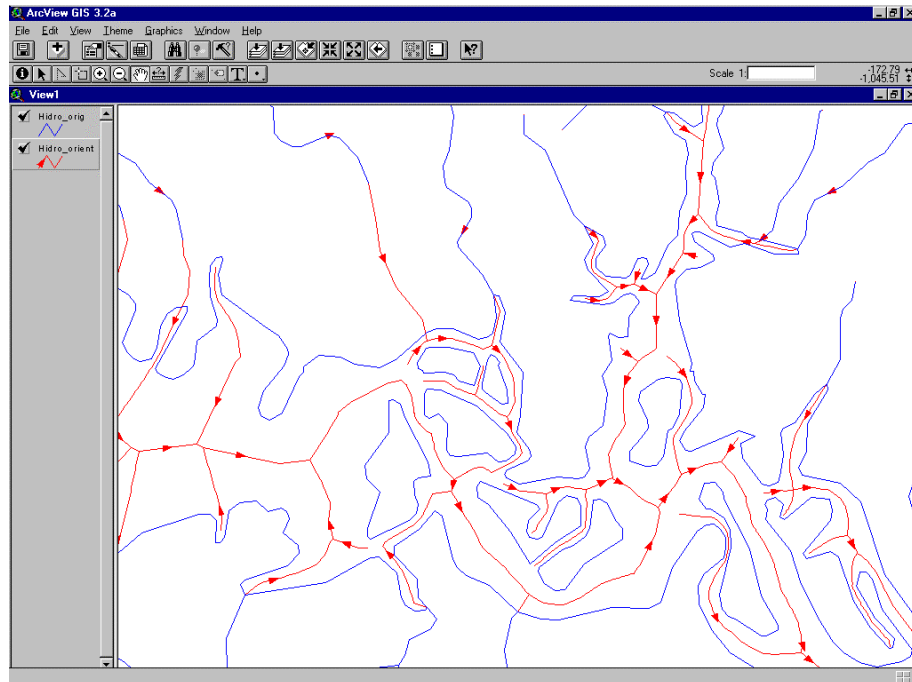


Figura 34 – Drenagem original de parte da base hidrográfica constante da carta topográfica do IBGE – rio Preto do Igapó-Açu, em azul (hidro_orig) e a simplificação da sua representação, em vermelho, orientada no sentido da foz (hidro_orient).

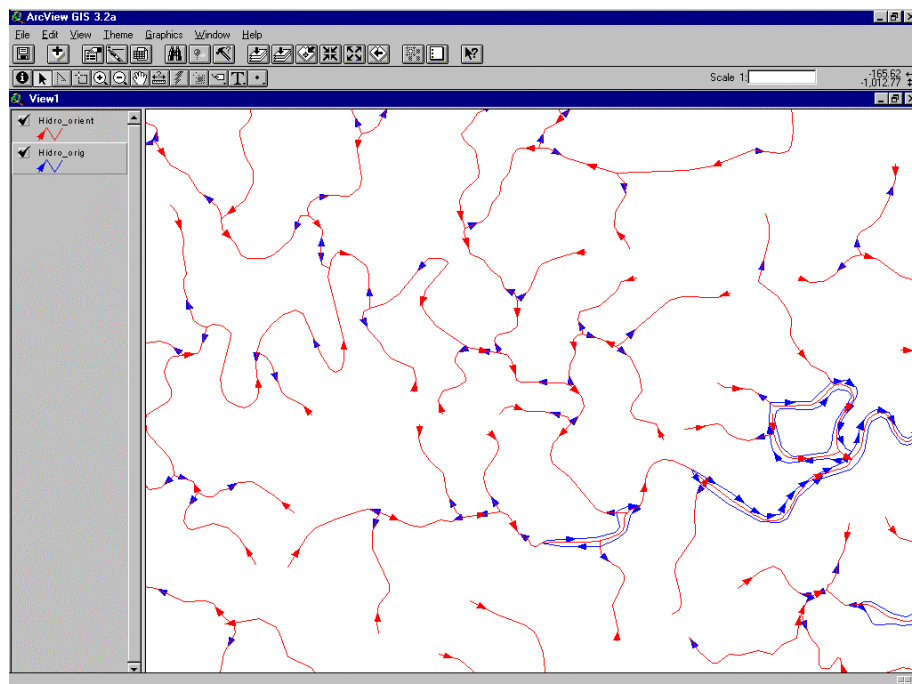


Figura 35 – Sentido de orientação da drenagem digital do IBGE, em azul (hidro_orig), e reorientação dos arcos para a foz, em vermelho (hidro_orient).

A Figura 36 mostra o resultado da validação visual do sentido de escoamento de toda a rede de drenagem simplificada, conectada e orientada. Observa-se que para cada drenagem existe um ponto que identifica a sua foz, dentro dos limites geográficos dos dados.

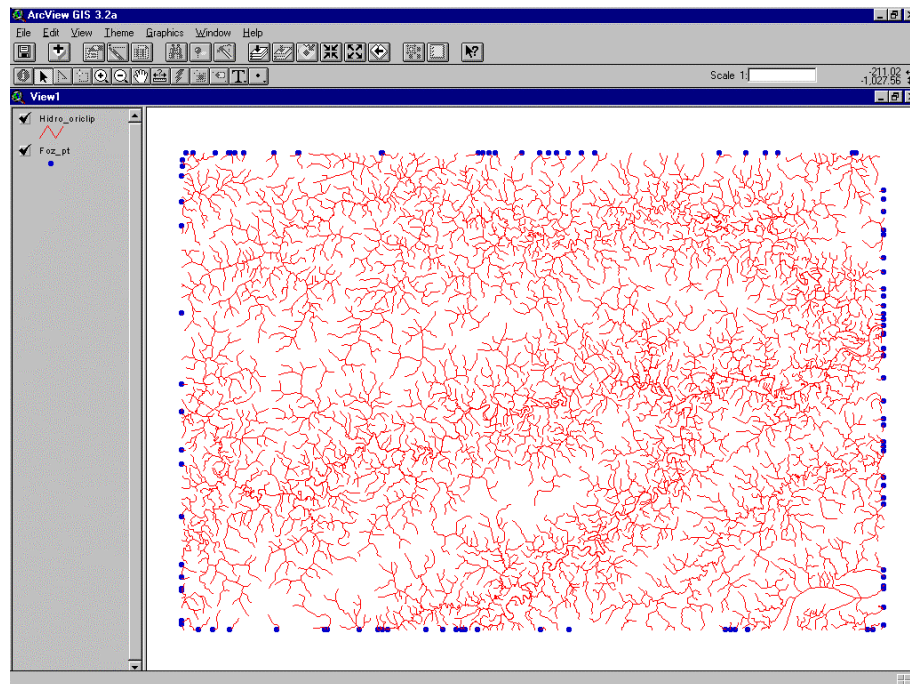


Figura 36 – Validação visual do sentido de escoamento da drenagem, em vermelho (hidro_oriclip) e representação dos exutórios das redes de drenagem indicadas por pontos azuis (foz_pt).

A Figura 37 apresenta o resultado do processo de ajuste visual da curva de nível à rede hidrográfica, sendo essa última a entidade espacial de maior confiabilidade extraída durante o processo de restituição aerofotogramétrica.

Observam-se, em vermelho, os segmentos de uma parte da curva de nível que foram ajustados de forma a haver a coincidência espacial do ponto de inflexão da isolinha com o respectivo segmento da drenagem já orientada no sentido da foz.

Esse procedimento é imprescindível no método, pois o TOPOGRID atua conservativamente na remoção das depressões espúrias, o que significa que a drenagem não será imposta no modelo nos locais onde houver conflito com os dados de elevação.

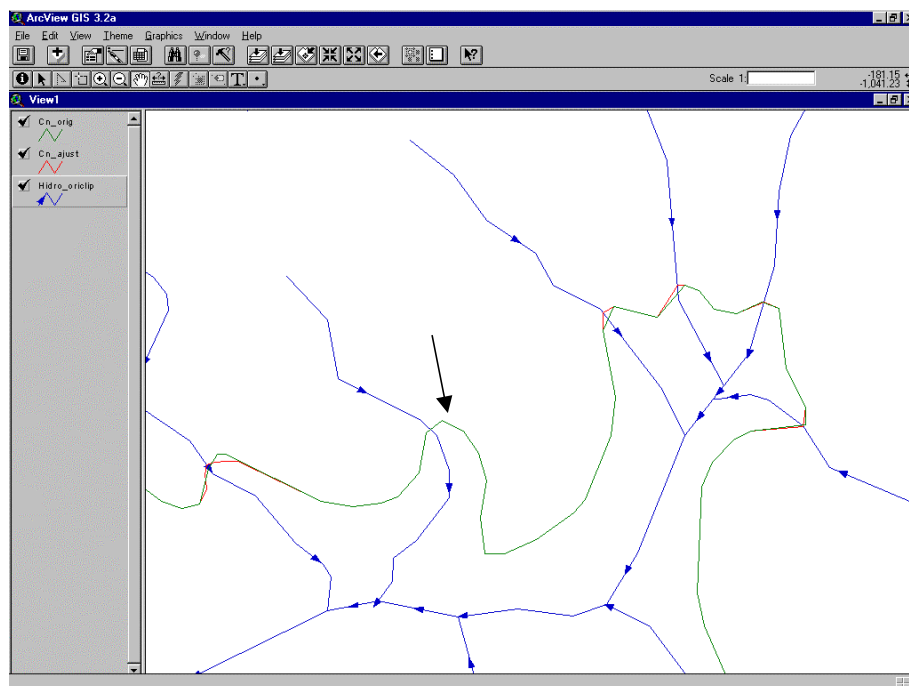


Figura 37 – Ajuste visual de segmentos da curva de nível, em vermelho (cn_ajust), à rede de drenagem simplificada e conectada (hidre_oriclip). Segmento central da isolinha, indicado pela seta, ainda não ajustado (cn_orig).

Por fim, a carta imagem de satélite, apresentada na Figura 38, mostra o uso do solo e cobertura vegetal de parte da área de estudo e dos dados processados e utilizados na geração do modelo digital de elevação – MDE via TOPOGRID. Com base nesse produto digital, analisou-se visualmente a consistência espacial dos dados digitais produzidos nesta etapa. Não foram observadas inconsistências expressivas, ainda mais considerando-se os aspectos da generalização cartográfica dos dados utilizados (escala 1:250.000).

Nessa etapa de pré-processamento os procedimentos manuais predominaram na operacionalização da metodologia proposta. Entretanto, a implementação de rotinas automáticas ou semi-automáticas permitiu reduzir substancialmente o tempo de execução de algumas das fases do processamento dos dados digitais de drenagem. A maior vantagem da automatização está na redução dos erros aleatórios decorrentes do caráter subjetivo do processamento manual pelo operador. A padronização de procedimentos torna-se mais importante à medida em que cresce o volume de dados a ser pré-processado.

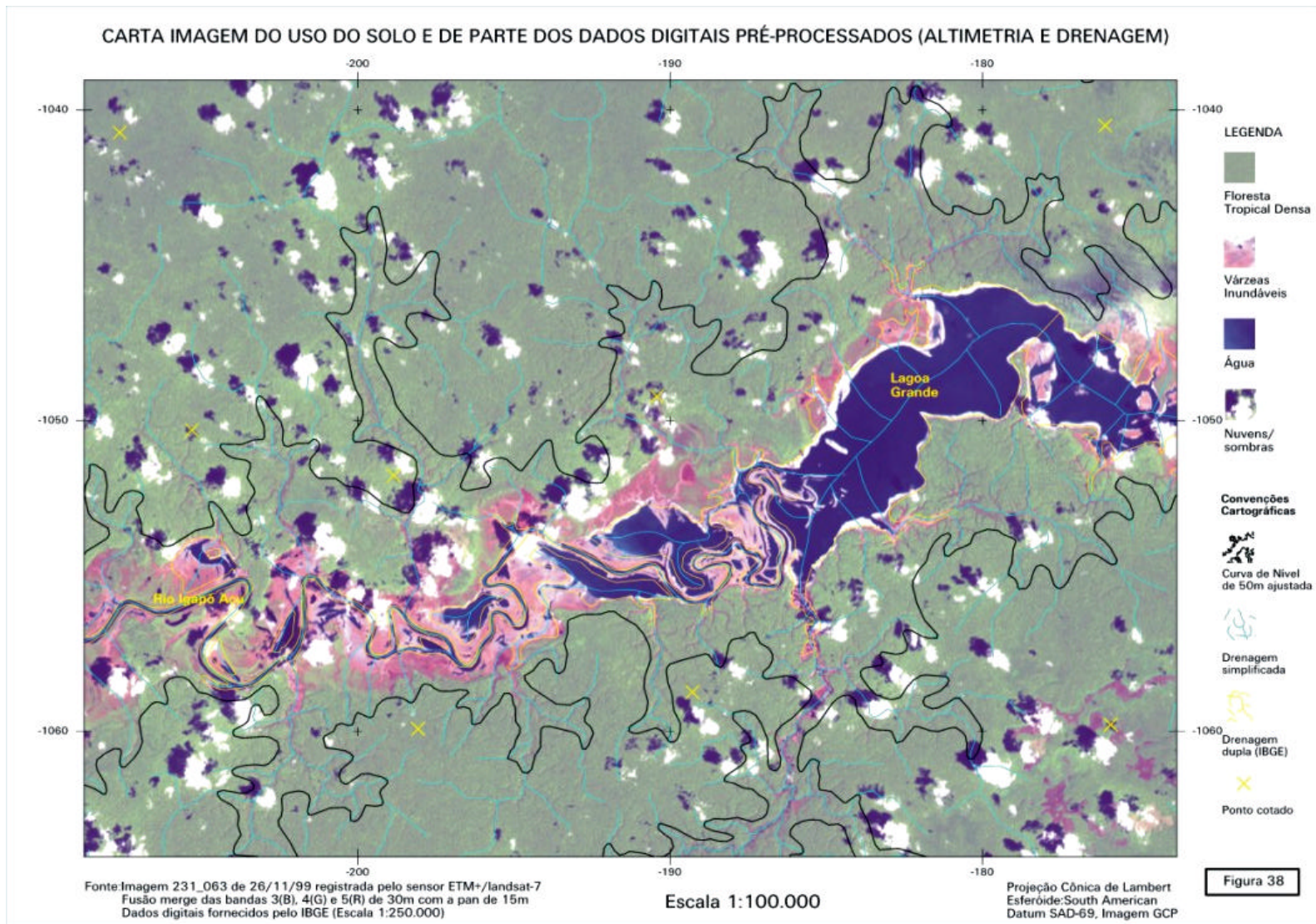


Figura 38 – Carta imagem de satélite.

4.2. Geração do Modelo Digital de Elevação via TOPOGRID/ArcInfo

O Quadro 6 mostra as estatísticas dos dados altimétricos de entrada (pontos cotados e isolinhas) e do MDE. A Figura 39 mostra o histograma da distribuição e o percentual das células do MDE por faixa de valores altimétricos.

A Figura 40 apresenta o Modelo Digital de Elevação – MDE gerado pelo TOPOGRID e mostra a localização e a distribuição espacial das 1.423 falsas depressões (*sinks*) remanescentes registradas no arquivo de diagnóstico gerado ao término da criação do MDE.

Tabela 6 – Estatística dos dados altimétricos de entrada e de saída do MDE

| | Pontos Cotados/(Isolinhas) (metro) | MDE |
|--|------------------------------------|------------|
| Número de pontos ou (isolinhas) ou células | 163 / (1) | 20.424.120 |
| Altitude máxima | 91 / (50) | 88 |
| Altitude mínima | 39 / (50) | 39 |
| Média | 62,4 / (50) | 55,5 |
| Desvio-Padrão | 9,6 / (-) | 7,94 |

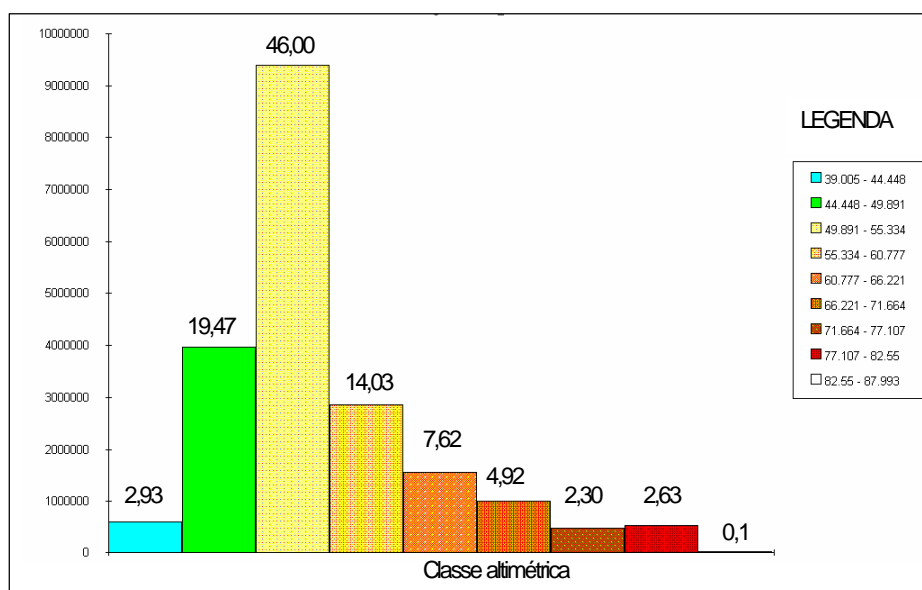


Figura 39 - Histograma e percentual das classes altimétricas do MDE.

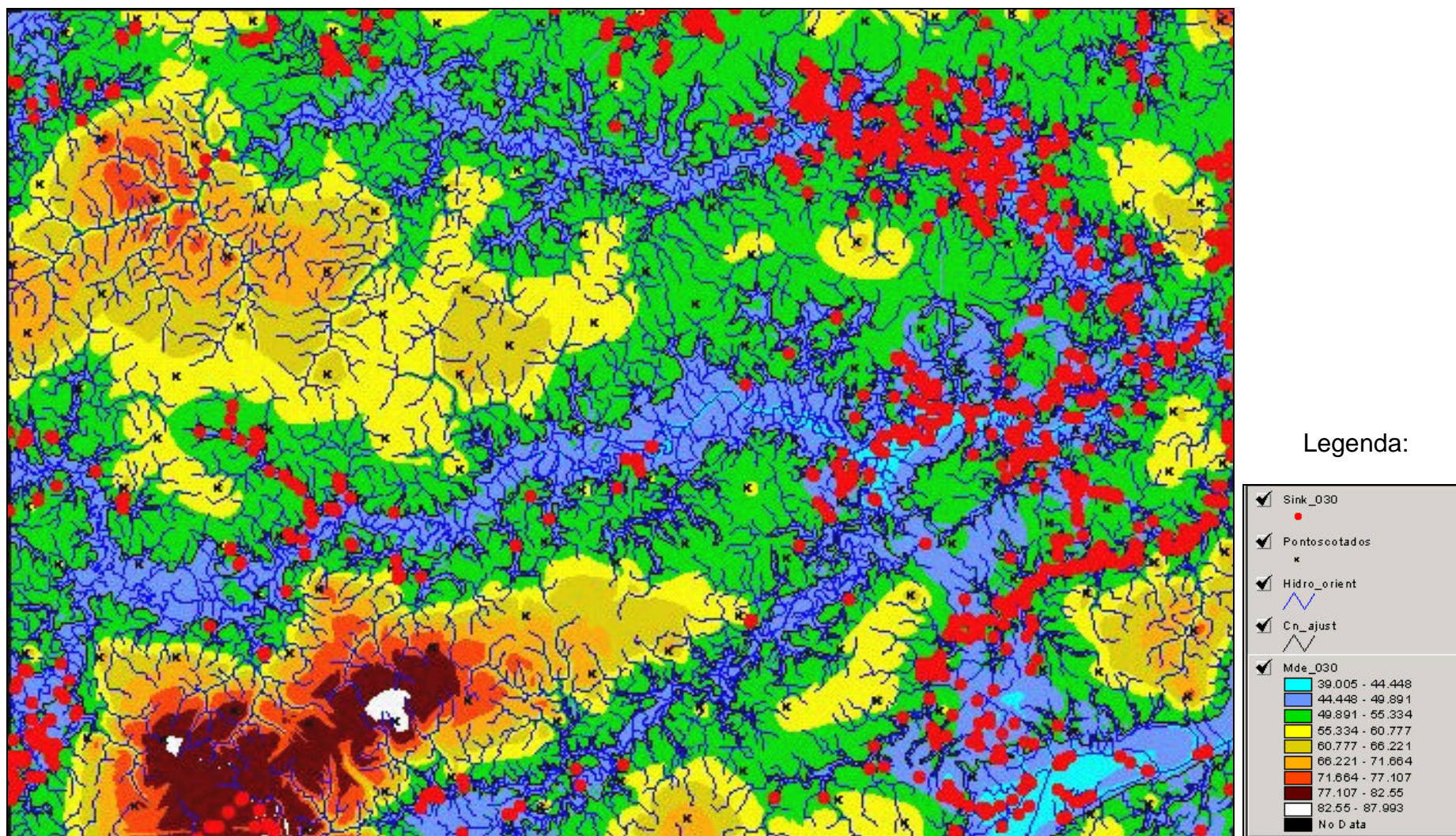


Figura 40 – Modelo Digital de Elevação gerado pelo TOPOGRID.

Após a análise desses resultados observa-se que a faixa altimétrica compreendida entre 49,89 e 55,33 m ocupa cerca de 46% da área total da carta, intermediando dois compartimentos bastante distintos na paisagem. Observa-se, também, que a ocorrência das falsas depressões concentra-se na parte leste do modelo, distribuídas nas partes mais baixas da superfície, no trecho compreendido entre a curva de nível de 50 m e a rede de drenagem e ao longo desta. Tal fato era esperado e pode ser associado, com base na literatura consultada, ao processo de interpolação, à inexistência de dados altimétricos nessas regiões e à alta resolução do MDE.

4.3. Pós-processamento para geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

A Figura 41 mostra o resultado do processo de conversão da representação vetorial da drenagem para o formato *raster* com largura de 30 m (1 célula) que foi utilizada no processo de *stream burning* e de refinamento de superfície (criação do TALVEGUE).

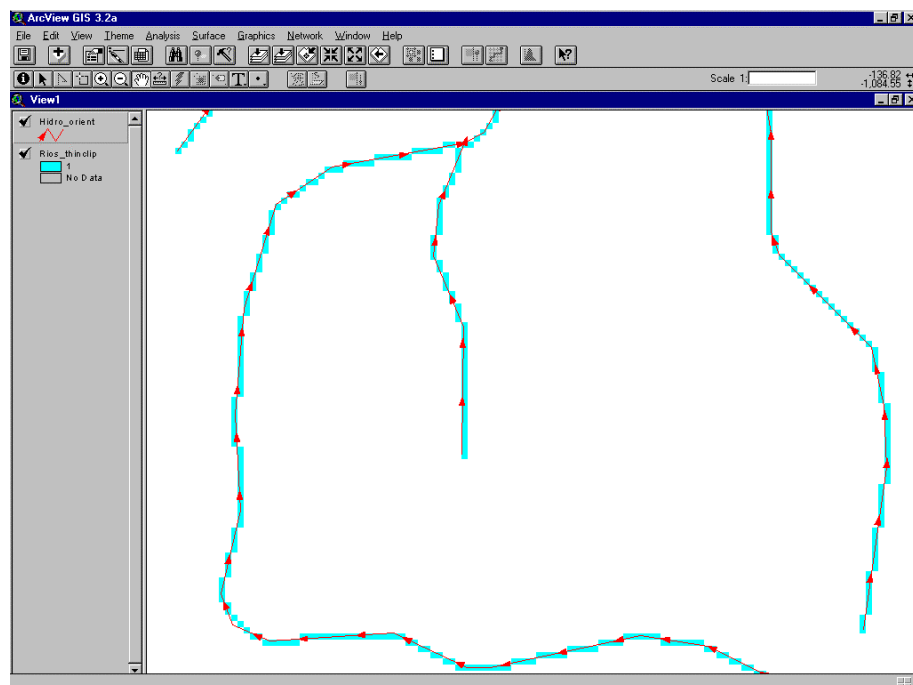


Figura 41 – Transformação do formato de representação da drenagem – vetorial, em vermelho (hidro_orient), para raster, em azul (riosthin_clip).

A Figura 42 mostra a altimetria da drenagem obtida através de operações matemáticas entre o MDE gerado pelo TOPOGRID e a hidrografia rasterizada.

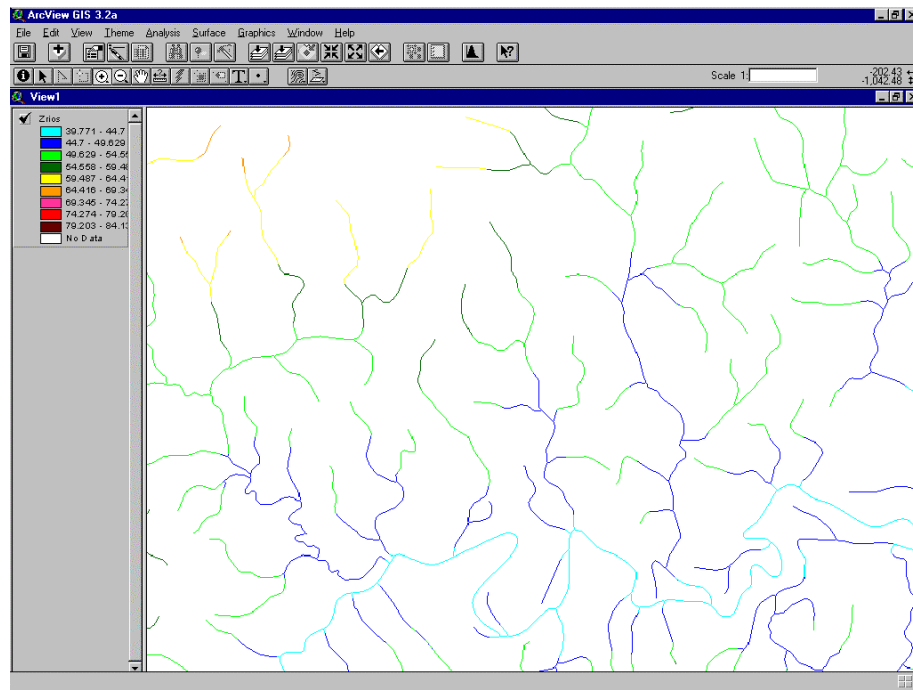


Figura 42 – Altimetria da rede de drenagem matricial – zrios (metros).

A Figura 43 mostra uma região do MDE produzido pelo TOPOGRID aprofundado ao longo da drenagem (em azul). A Figura 44 mostra, em uma outra parte do modelo, as depressões espúrias existentes ao longo da drenagem rasterizada e que foram removidas pelo comando FILL do ArcInfo. Para todo o modelo foram identificadas e removidas 9.425 depressões. Esse número é bem superior ao número de depressões geradas ao término do processo de interpolação pelo TOPOGRID, que foi de 1.423. A diferença é atribuída ao processo de *stream burning*. Observa-se, ainda nessa última figura, que a permanência dessas depressões no MDE podem interromper, em determinados trechos, o escoamento superficial na calha do modelo, representado na figura pela drenagem vetorial orientada.

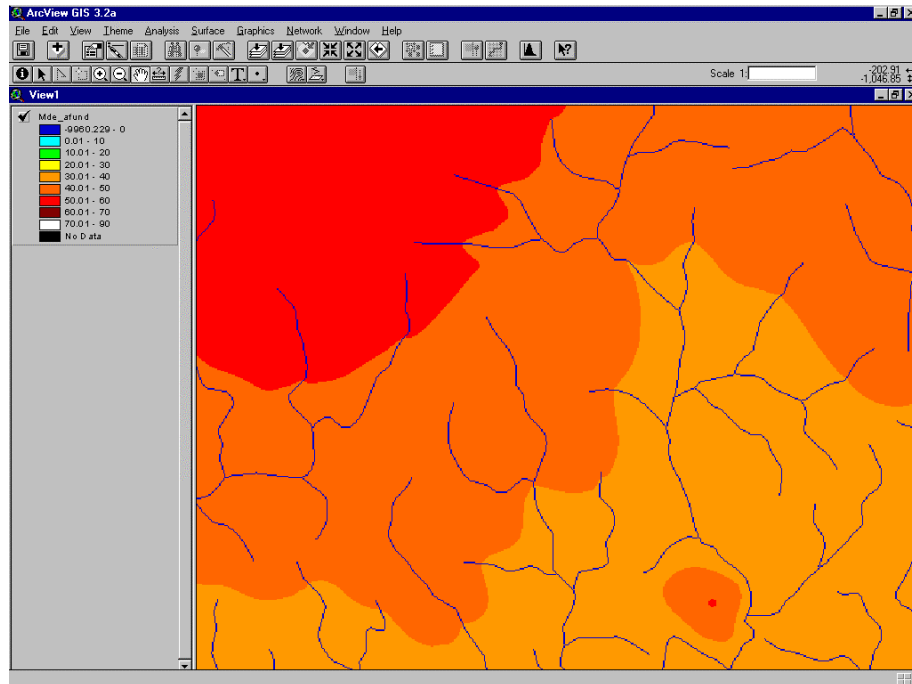


Figura 43 – Parte do MDE aprofundado ao longo da drenagem (Mde_afund).

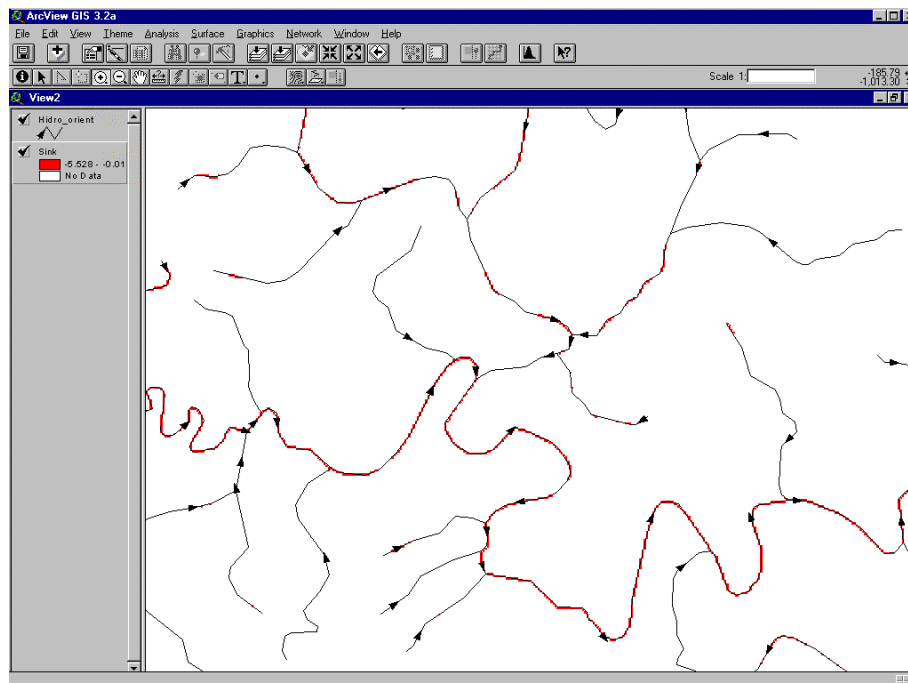


Figura 44 – Depressões espúrias eliminadas do MDE, em vermelho (Sink) sobrepostas à rede hidrográfica vetorial simplificada e orientada, em preto (hidro_orient).

O modelo digital de elevação produzido ao término das duas primeiras etapas de pós-processamento, não garante, em todos os casos, a convergência do escoamento superficial das células adjacentes ao traçado do rio para a calha do modelo. Para a solução desse problema executou-se, na terceira etapa, a construção de um TALVEGUE na região que se estende ao longo da drenagem do MDE. A Figura 45 mostra essa área, com largura de cinco células, para um determinado trecho do modelo e a Figura 45 apresenta a representação esquemática do TALVEGUE.

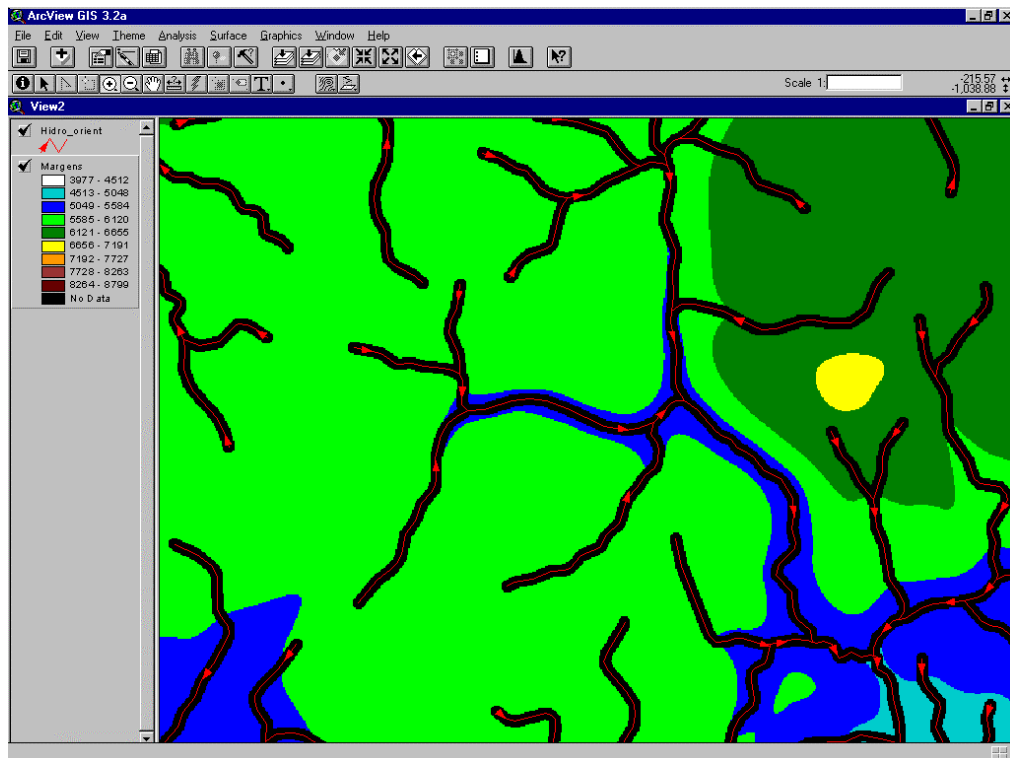


Figura 45 – Região de um trecho do modelo onde se construiu o TALVEGUE (área preta).

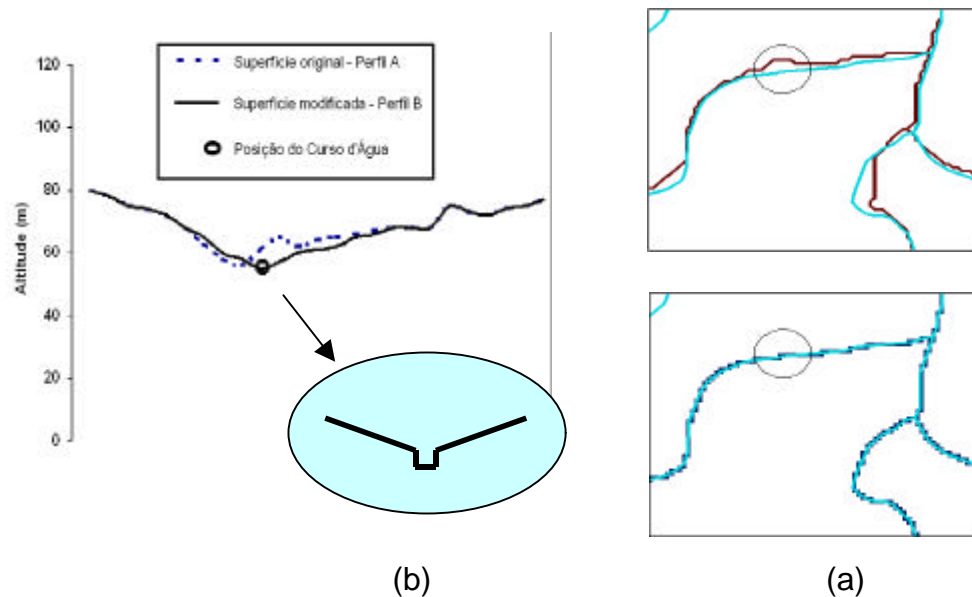


Figura 46 – Representação esquemática do TALVEGUE (b), posterior ao processo de *stream burning* (a).

O modelo digital de elevação gerado após a etapa de pós-processamento ainda não pode ser considerado hidrológicamente consistente para o escoamento superficial. Observou-se, após a aplicação do comando SINK sobre o MDEHC, o aparecimento de 7.795 novas depressões localizadas ao longo da drenagem numérica.

Os resultados apresentados, até então, mostram que a metodologia empregada assegura a convergência desse escoamento apenas até a drenagem numérica do modelo. Esta consistência hidrológica parcial é obtida à custa de uma descaracterização dos valores altimétricos da rede de drenagem e da área interna ao TALVEGUE. Este fato é irrelevante em regiões onde a largura do rio é superior à largura do TALVEGUE. Para o restante do MDEHC, os valores altimétricos originais do MDE gerado pelo TOPOGRID são integralmente preservados.

A etapa de pós-processamento do grid da direção de escoamento do MDEHC, apresentado na Figura 47, garante que a água superficial dentro da margem, criada ao longo da hidrografia e confinada na região do TALVEGUE, apresentada na Figura 48, irá escoar para a drenagem numérica e que todas as suas células, por sua vez, irão convergir para as seções de deságüe, conforme apresentado na Figura 49.

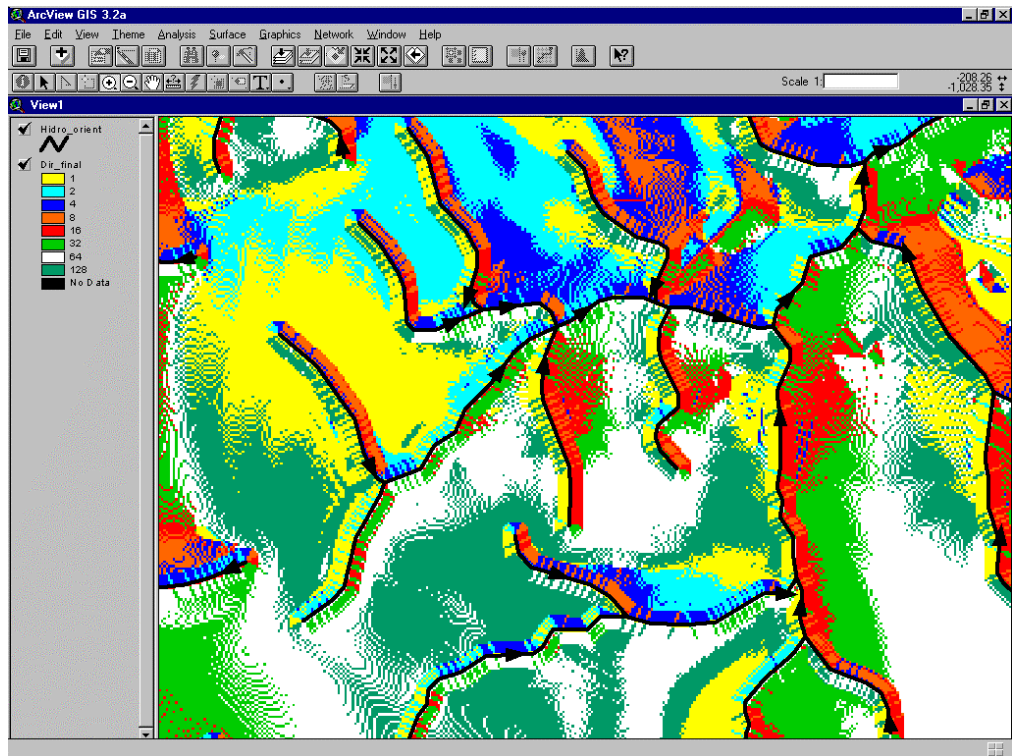


Figura 47 – Direção de escoamento de um trecho do MDEHC - modelo D8 (Dir_final).

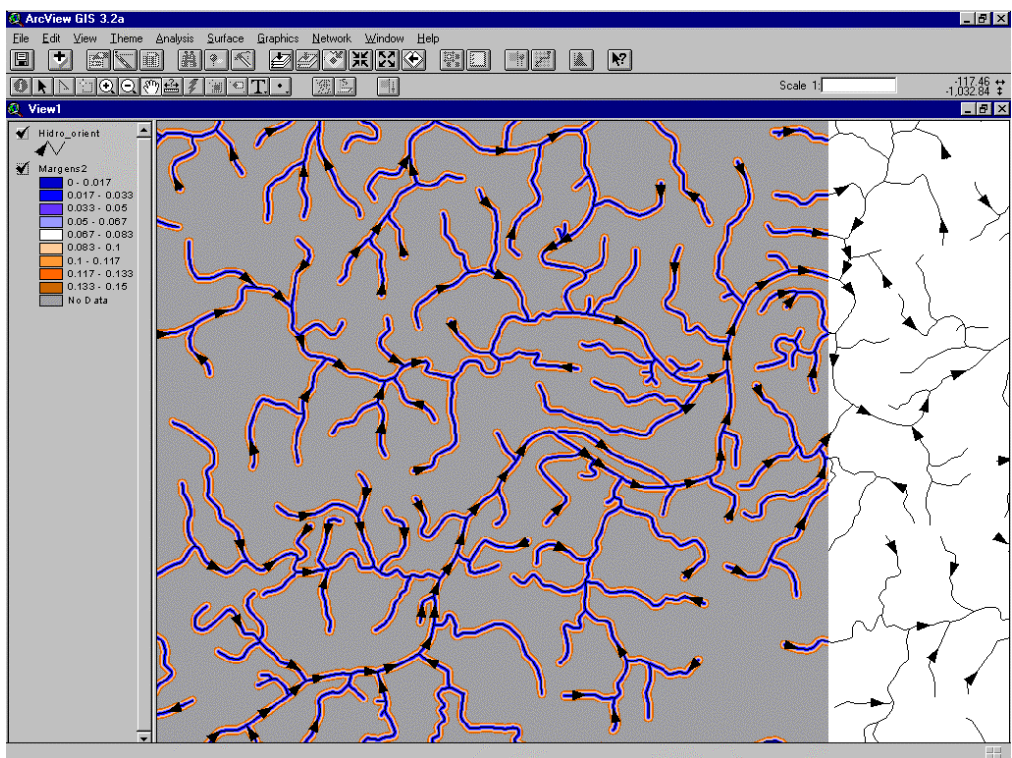


Figura 48 – Margem ao longo da hidrografia na região refinada pelo TALVEGUE próximo à borda do MDEHC (área branca).

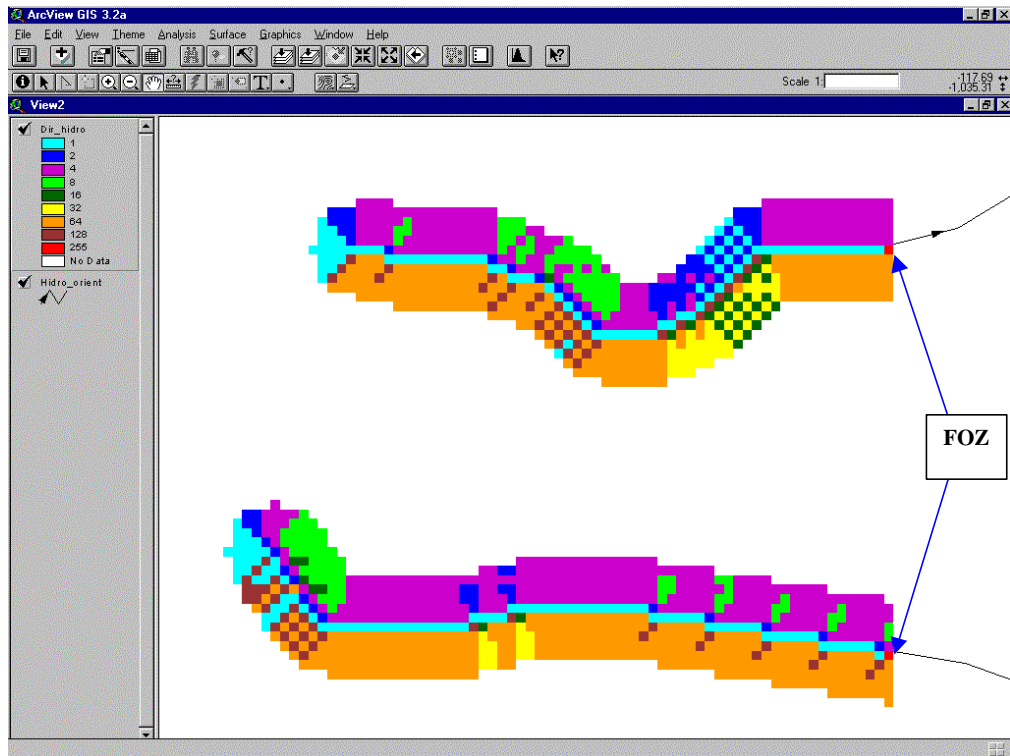


Figura 49 – Detalhe da direção de escoamento de cada uma das células de um trecho da margem apresentada na Figura 48 (Dir_hidro). O valor 255, em vermelho na borda direita do modelo, indica a foz.

4.4. Validação metodológica

4.4.1. Exatidão de representação da hidrografia mapeada

A Figura 50 mostra as drenagens vetoriais extraídas automaticamente com limiar superior de 2.000 células a partir dos *grids* da direção de escoamento e do fluxo acumulado do MDE gerado pelo TOPOGRID e pelo *grid* da direção de escoamento corrigido do MDEHC. Através da análise dessas duas drenagens, sobrepostas à drenagem vetorial simplificada e orientada, observa-se, em vermelho para o trecho apresentado, uma acentuada discrepância espacial entre o trajeto da drenagem gerada a partir do uso do TOPOGRID. A utilização isolada desse interpolador para grandes áreas de planície com baixa densidade de pontos de altimetria não garante a fidelidade de representação da hidrografia mapeada.

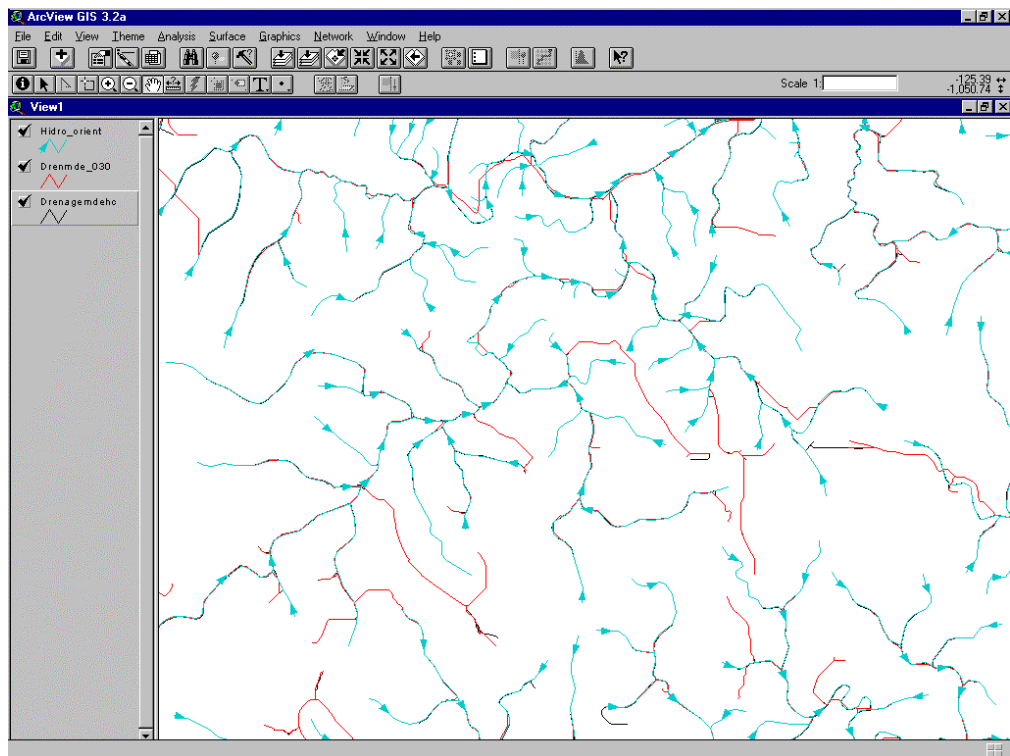


Figura 50 – Comparação da distribuição espacial das drenagens vetoriais. Em vermelho, a drenagem extraída a partir do MDE-TOPOGRID (Drenmde_030); em preto, a drenagem extraída a partir do MDEHC corrigido; e em azul, a drenagem vetorial da base do IBGE (hidro_orient).

Por sua vez, a drenagem extraída a partir da metodologia proposta apresenta maior consistência espacial. Os segmentos da drenagem onde ocorrem divergências espaciais são restritos a determinados locais e podem ser decorrentes da manutenção dos fundos de vale inicialmente identificados na geração do modelo via TOPOGRID. Além disto, nem todos esses segmentos são provenientes de erros de interpolação, pois podem tratar-se de tributários não-cartografados na escala de mapeamento.

4.4.2. Exatidão da delimitação de bacias hidrográficas

As Figuras 51 e 52 mostram, respectivamente, o resultado da delimitação automática das bacias hidrográficas a partir dos *grids* de direção de escoamento do MDE gerado pelo TOPOGRID e pelo MDEHC. Observe-se que a delimitação do limite externo das bacias a partir do MDEHC foi

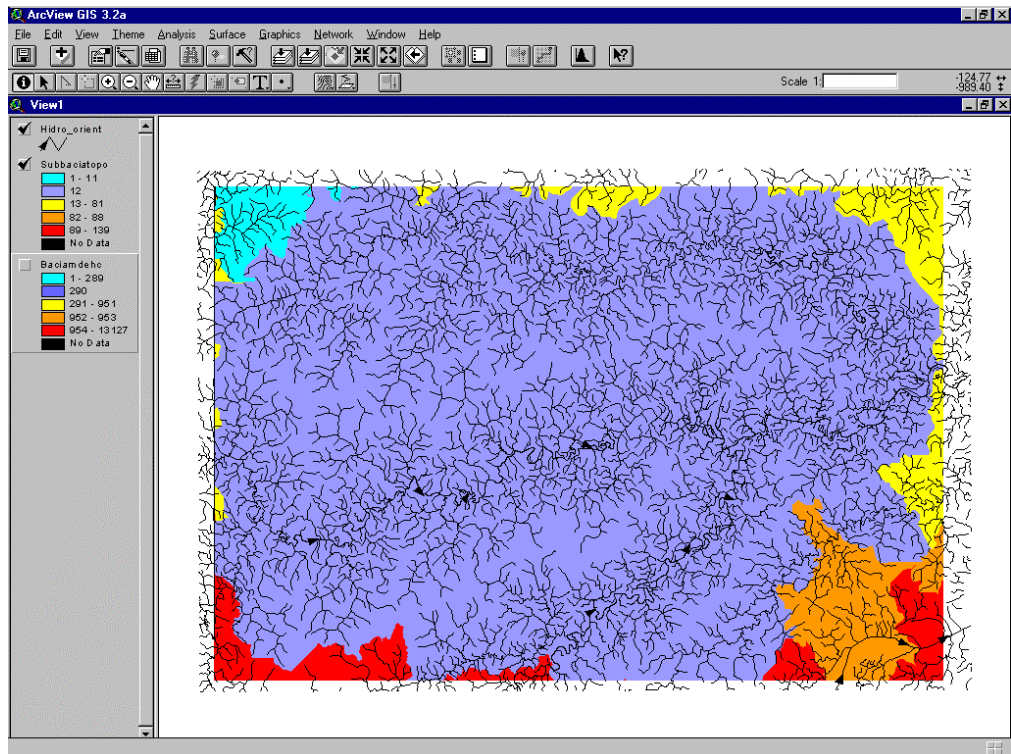


Figura 51 – Delimitação automática de bacias hidrográficas a partir do MDE gerado pelo TOPOGRID (subbaciato) com a hidrografia do IBGE sobreposta.

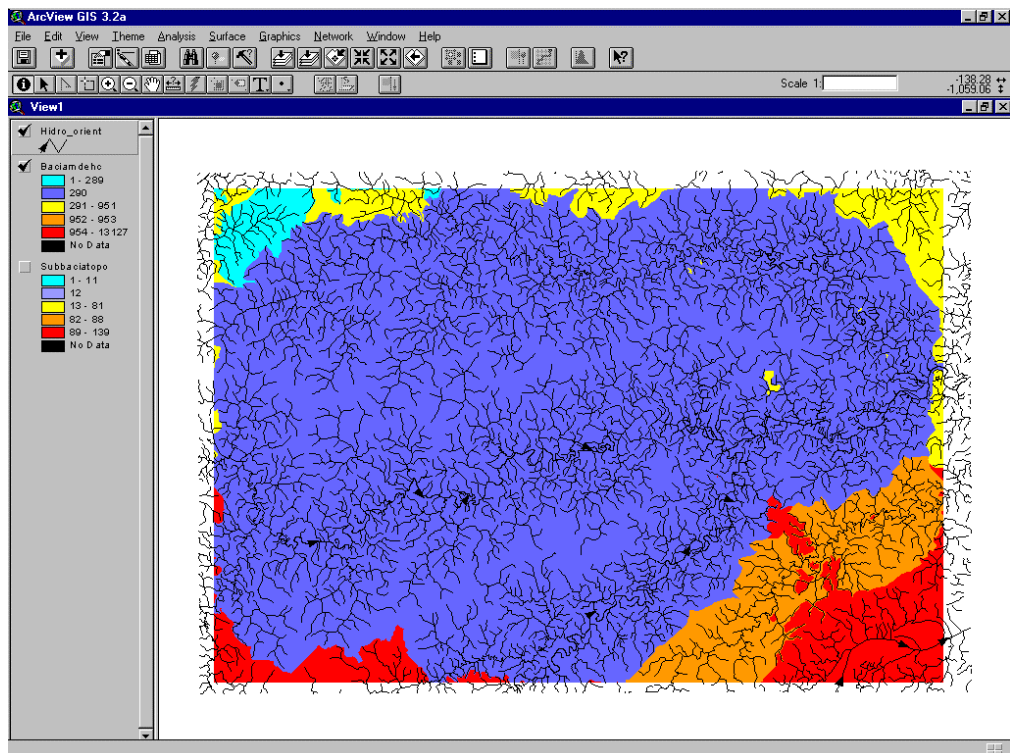


Figura 52 – Delimitação automática de bacias hidrográficas a partir do MDEHC gerado pela metodologia proposta.

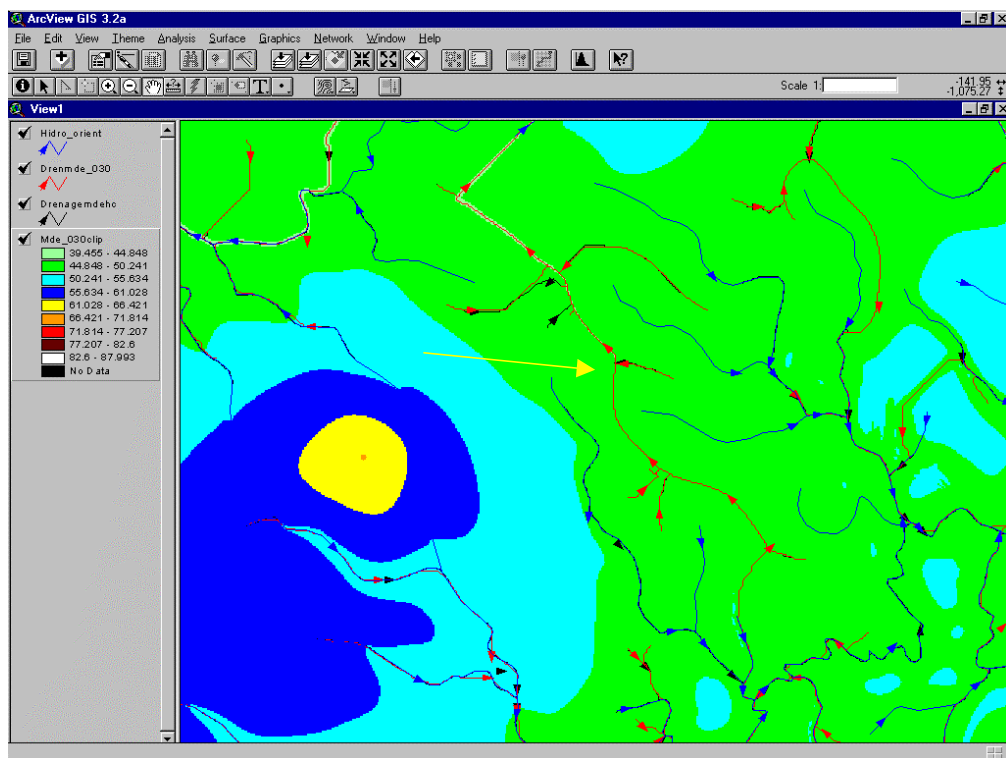


Figura 53 – Detalhe da inconsistência hidrológica do Modelo Digital de Elevação, mostrado pela seta amarela.

mais consistente do que a proporcionada pelo TOPOGRID. Entretanto, a delimitação das bacias na parte sudeste do modelo foi insatisfatória em ambos os casos.

Após uma investigação do problema, mostrado em detalhe na Figura 53, observou-se que se trata de erro de interpolação do software TOPOGRID induzido pelo baixo valor do parâmetro Tol1, utilizado durante a geração do modelo, em conjunto com a sua alta resolução espacial (30 m). O valor de 2,5 restringiu em demasia a utilização dos pontos altimétricos, que já eram escassos, numa região plana e alagada formadora do divisor das bacias. Com isso, os pontos cotados disponíveis não permitiram a correta caracterização do relevo pelo interpolador nessa resolução.

Para solução desse problema propõem-se duas alternativas. A primeira seria a utilização de uma resolução menor, 50 m por exemplo. Essa solução foi adotada nos trabalhos executados pelo Laboratório de Geomática do Projeto SIF/SIVAM. A segunda alternativa seria a utilização de um valor de Tol1 menos restritivo de forma que o interpolador possa utilizar

um maior número de dados altimétricos.

A Figura 54 mostra o MDE gerado pelo TOPOGRID, com o valor de Tol1 de 7,5, onde se observa a correta caracterização do relevo nessa região demonstrado por isolinhas sobrepostas ao modelo e também pela geração da drenagem derivada a partir desse novo modelo.

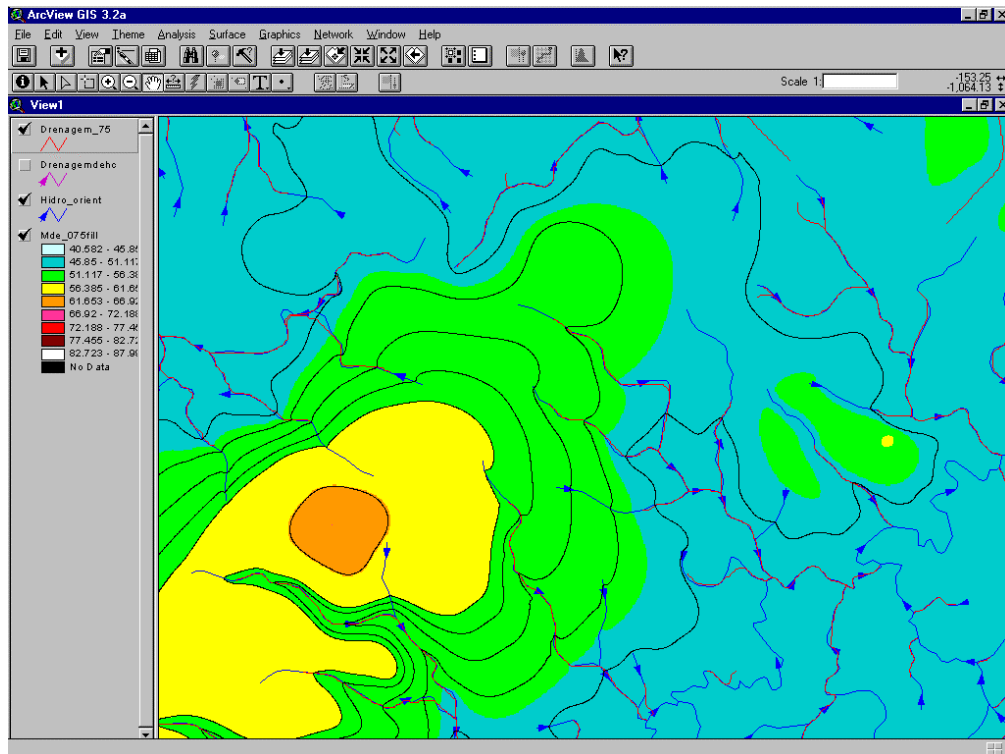


Figura 54 – Detalhe da MDE gerado pelo TOPOGRID com Tol1 de 7,5.

4.5. Aplicabilidade do produto

Sob o ponto de vista conceitual, o MDEHC deveria ser capaz de representar com exatidão a forma da terra suportando análises numéricas de superfície, tais como as explicitadas no item 3.1.3., e servir de suporte a estudos de hidrologia superficial. Entretanto, sob o ponto de vista prático, na região da Amazônia Legal, onde se insere a área de estudo, a qualidade e a quantidade dos dados altimétricos é bastante inferior à dos dados hidrográficos. Esta constatação, em geral, restringe a aplicabilidade do modelo, de forma diferenciada, para a área de estudo.

Em ambos os casos de aplicação as análises devem se limitar a escalas iguais ou inferiores aos dos dados de origem – IBGE -1:250.000. No caso de estudos hidrológicos, deve-se sempre utilizar o *grid* de direção de escoamento corrigido em conjunto com o MDEHC em face da inexistência de depressões espúrias nesse produto. Essa recomendação técnica é imprescindível para a garantia da confiabilidade dos demais subprodutos gerados a partir de então, tais como a rede de drenagem e bacia de contribuição, dentre outros.

Os principais usos potenciais do MDEHC, desenvolvido a partir da metodologia proposta para estudos de hidrologia superficial estão discriminados a seguir.

4.5.1. Delimitação automática de bacias hidrográficas

Diversos testes foram conduzidos para delimitação da bacia de contribuição à montante de um determinado ponto do modelo. Os resultados mostraram-se bastante consistentes. As Figuras 55 e 56 apresentam os resultados de dois dos testes efetuados para bacias de contribuição de tamanhos diferenciados. Essa funcionalidade da metodologia proposta subsidia, por exemplo, inventários hidrelétricos regionais e estudos ambientais na Amazônia Legal.

4.5.2. Visualização do trajeto de escoamento superficial de um ponto selecionado até a sua foz

Os testes conduzidos com o MDEHC para definição do trajeto do escoamento superficial, a partir da escolha de pontos aleatórios sobre a superfície do modelo, também se mostraram bastante consistentes. A Figura 57 mostra o resultado de um dos testes para uma extensa área de planície aluvial, onde se observa a consistência do trajeto do escoamento. Este tipo de aplicação é útil na Bacia Amazônica em estudos de impacto ambiental de contaminantes, como, por exemplo o mercúrio, e em implantação de planos emergenciais de contenção de vazamento em oleodutos.

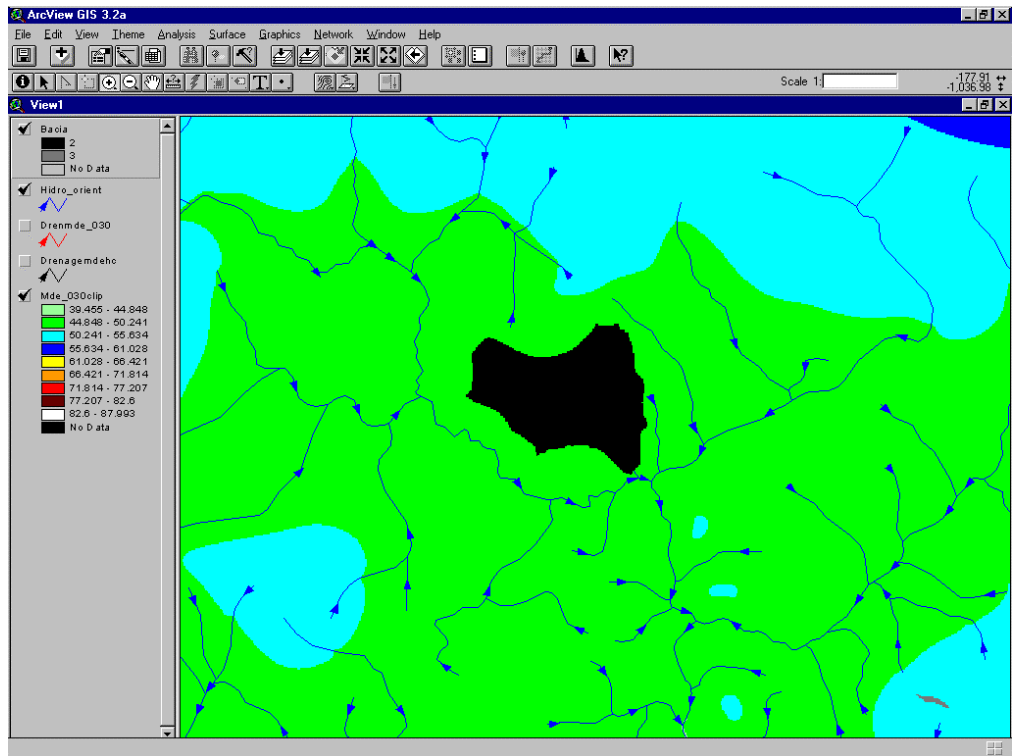


Figura 55 - Delimitação de uma pequena bacia de contribuição, em preto.

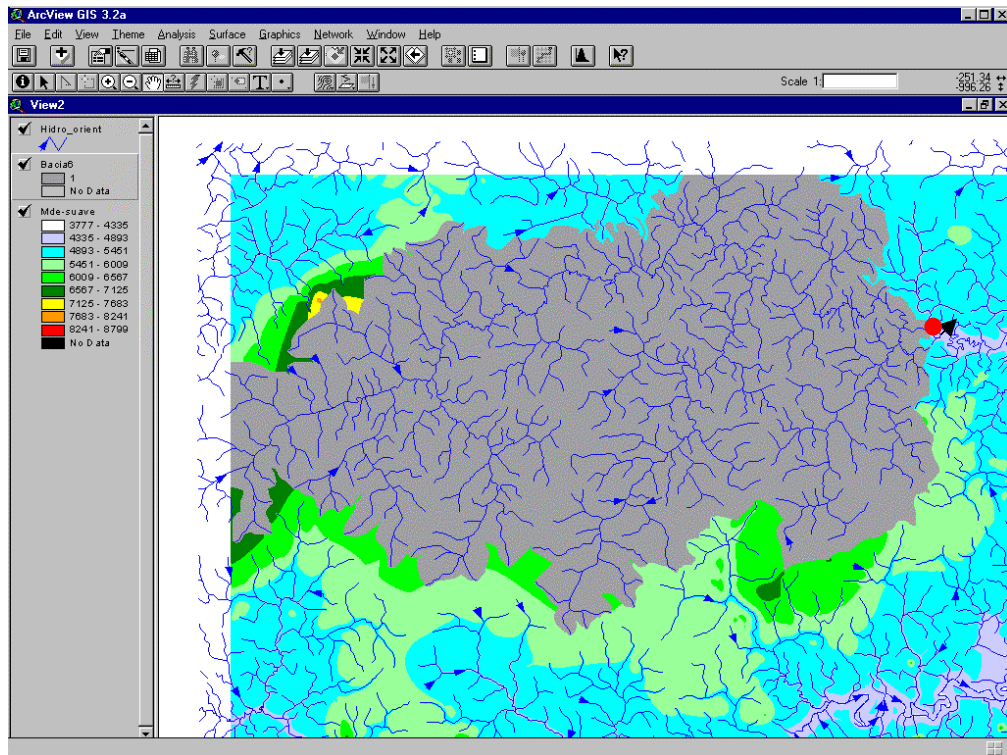


Figura 56 – Delimitação de uma bacia de contribuição maior, em cinza, a partir de um ponto de interesse (ponto vermelho).

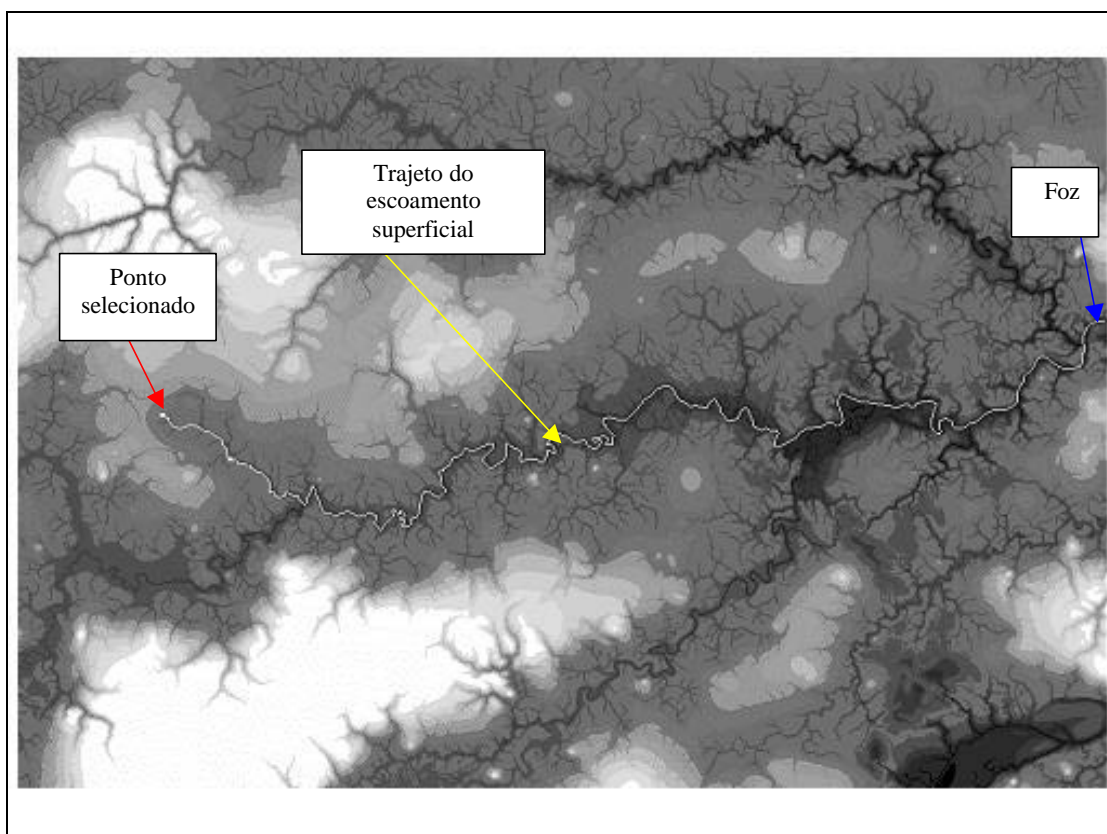


Figura 57 – Delineamento de um escoamento superficial em área de planície aluvial.

5. CONCLUSÕES

O aplicativo TOPOGRID, disponível no módulo *grid* do *software* ArcInfo, é, segundo a literatura consultada, um dos principais algoritmos comerciais utilizados para geração de um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente – MDEHC. Entretanto, o uso isolado desse aplicativo não produziu resultados satisfatórios para geração de um MDEHC em uma área-teste na Bacia Amazônica, caracterizada por um relevo predominantemente plano e por possuir dados altimétricos escassos e de baixa confiabilidade.

A implementação e aplicação conjunta de técnicas de pós-processamento do MDEHC, baseadas nos métodos de *stream burning* e de refinamento de superfície, também mostraram-se insuficientes para a geração de um modelo com ausência de depressões espúrias ao longo da hidrografia numérica. Em geral esses métodos produzem resultados satisfatórios em superfícies de relevo suave ondulado a montanhoso. A presença dessas depressões interrompe o correto direcionamento do fluxo do escoamento superficial para a foz e gera imperfeições no delineamento automático da rede de drenagem e dos limites das bacias hidrográficas.

A solução proposta, baseada na orientação da direção de escoamento para a seção de deságüe das células internas a uma margem, criada ao longo da drenagem numérica, resolveu esses problemas sem que houvesse a necessidade de se aplicarem novamente as técnicas

inicialmente implementadas, que demandam muito tempo de processamento e que não garantem a eliminação de todas as depressões remanescentes.

Os resultados obtidos demonstraram que a metodologia proposta apresenta-se como alternativa viável para extração automática dessas duas variáveis fisiográficas para a área de estudo e para outras áreas com características topográficas similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranoff, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Canadá: WDL Publications, 1986.
- Aurélio, B.H.F. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 2. ed., 1986, 1.479p.
- Band, L.E. Topographic partitioning of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v.22, n.1, p.15-24, 1996.
- Barbali, D., Omerbegovi, V. **Correction of horizontal areas in TIN terrain modeling – algorithm**. 13p. (<http://www.esri.com/library/userconf/proc99/papers/pap924/p924.htm>).
- Bourk, P. **Triangulate – an algorithm for Interpolating Irregularly - Spaced Data with Applications in Terrain Modeling**. 1989. 8p. (<http://www.mhri.edu.au/~pdb/modelling/triangulate>).
- Burrough, P. A. **Principles of geographical information systems for earth resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- Câmara, G., Medeiros, C.M.B. **Geoprocessamento para projetos Ambientais**. 2. ed., São José dos Campos-SP: INPE, 1998.
- Chrisman, N. **Exploring geographic information systems**. New York: John Willey & Sons, 1997.
- Djoikic, D., Ye, Z. DEM preprocessing for efficient watershed delineation. In: **Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems**. ESRI Press, 2000.
- Eastman, J.R. **Idrisi for Windows - User's guide v. 2.0**. Clark University, 1997.

Environmental Systems Research Institute, Inc - ESRI. **ArcInfo version 7.0.4 On-line documentation**. Redlands, Ca, 1996.

Ehlschlaeger, C.R. **Using the at search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation data**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL GEOGRAFIC INFORMATION SYSTEM (IGIS) SYMPOSIUM, Baltimore, MD, 275 - 281. (<http://everest.hunter.cuny.edu/~chuck/IGIS/paper.htm>)

Engman, E.T., Gurney, R.J. **Remote sensing in hydrology**. London: Chapman and Hall, 1991. 225p.

Erdas. **Erdas Field Guide**, Atlanta, Ga, 1995.

Felgueiras, C.M.B. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2 ed., São José dos Campos-SP: INPE, 1998.

Freeman, T.G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v.17, n.3, p.413-422, 1991.

Furtado, A.M. **Metodologia para extração de informações hidrológicas a partir de um modelo digital de elevação utilizando sistemas de informações geográficas**. Monografia apresentada no I Curso de Especialização em Geoprocessamento, IGC/UFMG/CETEC, Belo Horizonte-MG, 1998. 42p.

Gallant, J.C., Hutchinson, M.F. **Towards an understanding of lanscape scale and structure**. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, Santa Fe, New Mexico, 1996. (http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/gallant_john/paper.html)

Garbrecht, J.; Martz, W. Comment on digital elevation model grid size, landscape representation, and hydraulic simulations. **Water Resources Research**, v.32, n.5, p.1461-62, 1996.

Garbrecht, J., Martz, W. **TOPAZ: an automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parametrization; TOPAZ overview**. U.S.Department of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS publication, 1997.

Geopak Corporation, **Geoterrain - User Guide**, 1996.

GISHydro Workshop, Dallas, Texas, 1997, 1998. (<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/class/wshed.html>).

GISHydro Workshop, 2000. (<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/class/wshed.html>).

Guerra, A.J.T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 4.ed., Rio de Janeiro: IBGE, 1975. 439p.

- Guerra, A.J.T., Cunha, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2.ed., Rio de Janeiro, 1995.
- Hellweger, F. Agree - **DEM Surface Reconditioning System** , 1997. (<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree>).
- Hutchison, M.F. **A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models**. In: PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE/WORKSHOP ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, NATIONAL CENTER FOR GEOGRAPHIC INFORMATION AND ANALYSIS. University of California, Santa Barbara, 1996.
- Hutchinson, M.F. **Calculation of hydrologically sound digital elevation models**. In: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING. Sydney Columbus, Ohio: International Geographical Union, 1988.
- Hutchinson, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hidrology**, v.106, p.211-232, 1989.
- Jenson, S.K., Domingue, J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.11, p.1593-1600, 1988.
- IBGE, 1972. **Carta topográfica do rio Preto do Igapó-Açu**. Escala 1:250.000.
- IBGE, 1973. **Mapa de unidades de relevo do Brasil**. Escala 1:5.000.000.
- Instituto Nacional de Pesquisas espaciais – INPE. **Sistema de processamento de imagens e informações georreferenciadas V. 3.0**. Documentação on-line, 1997. (<http://www.dpi.inpe.br/spring>).
- Instituto Nacional de Pesquisas espaciais - INPE. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2ªed., São José dos Campos-SP, 1998.
- Maidment, D.R. **GIS and Hydrologic Modeling - An Assessment of Progress**. In: NCGIA - THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GIS AND ENVIRONMENTAL MODELLING, Santa Fé, New Mexico, 1996. (http://ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/maidment_david/maidment.html).
- Maidment, D.R. **Delineation of watersheds and streams**. In: GISHydro Workshop, Dallas, Texas, 1997. (<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/class/wshed.html>).
- Martz, L.W., De Jong. CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. **Computer and Geosciences**, v.14, n.5, p.627-40, 1988.

- Martz, L.W., Garbrecht, J. Numerical definition of network and subcatchment areas from digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v.18, n.6, p.747-761, 1992.
- 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.
- Martins, P. **Epistemologia da ciência**. Notas de aula. Belo Horizonte, 2001.
- Mendes, C.A.B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. **Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Recursos Hídricos**, v.1, n.14, 1996.
- Namikawa, L.M. **Um método de ajuste de superfícies para grades triangulares considerando a quebra de continuidade das linhas características**. São José dos Campos-SP: INPE , 1995 (Dissertação de Mestrado). (<http://sputinik.dpi.inpe.br/spring/papers/tinsbsr.html>)
- Nelson, J., Jones, N.L. **Utilizing the ArcInfo data model to build conceptual models for environmental/hydraulic/hydrologic simulations**. In: ESRI USER'S CONFERENCE, maio, 1996, Palm Springs, Califórnia, USA.
- O'Callaghan, J.F., Marl, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**. v.28, p.324-44, 1994.
- Olivera, F., Maidment, D.R. **Storm runoff computation using spatially distributed terrain parameters**. In: ASCE NORTH AMERICAN WATER AND ENVIRONMENT CONGRESS 96, Anaheim, California, 1996.
- Olivera, F., Maidment, D.R. **GIS tools for HMS modeling support**. Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems, ESRI Press, 2000.
- Perez, A. Source water protection project: **A Comparison of Watershed delineation Methods in Arc/Info and ArcView GIS**. Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems, ESRI Press, 2000.
- Pinto, S. **Um Sistema de Representação de Relevos**. Tese de mestrado. DCC/ICEX/UFMG, Belo Horizonte, 1994, 64 p.
- Projeto RadamBrasil. **Programa de integração nacional**. Volume 17, Folha SB 20 PURUS. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 1978.
- Reed, S. National Weather Service Hydrologic Research Laboratory, 1999.
- Ribeiro, C.A.A.S. **Sistema de informações geográficas aplicados a recursos hídricos**. Apostila de curso. Viçosa, 2000.

- Rubert, O.A.V., Ribeiro, C.A.A.S., Chaves, M.A. **Um Novo Divisor de Águas na Geração de Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 1999.
- Sakude, M.T.S. **Modelagem de Terrenos por Superfícies Triangulares de Bezier.** Anais do SIBGRAPI V, 1992, p. 213 -222.
- Saunders, W. K. **Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis.** Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic information Systems, ESRI Press, USA, 2000.
- Saunders, W.K.; Maidment, D.R. **A GIS Assessment of Nonpoint Source Pollution in the San Antonio-Nueces Coastal Basin.** Center for Research in Water Resources On Line Report 96-1, University of Texas, Austin, Texas, 1996.
- Smemoe, C.; Nelson, E.J.; Jones, N.L. **From a Grid or Coverage to a hydrograph:Unlocking your GIS data for hydrologic applications,** ESRI User Conference, 1997.
- Star, J; Estes, J. **Geographic Information Systems - An Introduction.** Prentice-Hall, 1990.
- Tribe, A. **Automated Recognition of Valley Heads from Digital Elevation Models.** Earth Surface Process and Landforms 16(1):33-49, 1991
- Tribe, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. **Journal of Hidrology**, v.139, p.263-293, 1992.
- U.S.G.S EROS Data Center, **GTOPO30 Global 30 Arc Second Elevation Data Set**, Documentation, 1996. (<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/README.html>).
- U.S.G.S. EROS Data Center, **HIDRO1K Elevation Derivative database**, Documentation, 1997 (<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/hydro/readme.html>).
- Verdin, K.L., Jenson, S.K. Development of Continental Scale Digital Elevation Models and Extraction of Hydrologic Features. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 3, WORKSHOP ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, Santa Fé, NM: NCGIA. **Proceedings...** CD-Rom. 1996.
- Walker, A., Muller, J.P., Morley, J., Nadem, P.S. Remote sensing and hydrology: accumulation network extraction from digital elevation models and their use in continental and global scale hydrological models. In: THE ANNUAL REMOTE SENSING SOCIETY ONE DAY STUDENT MEETING. University College London, 1997. (http://www.ps.ucl.ac.uk/awalker/RSS_student_sem_97/rss_seminar97.html).

Wang, X., Yin, Z. An evaluation of using ArcInfo to extract basin physiographic parameters from DEMs. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE PROCEEDINGS, ESRI, Redlands, Ca, 1997.

Wilson, J.P.W. **GIS-based land surface/subsurface Modeling: New Potencial for new models?** (http://ncgia.ncggia.ucsb.edu.com/santa_fe_cd-rom/sf_papers/wilson_john/wilson.htm.)

Zhang, W., Montgomery. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**, v.30, n.4, p.1019-28.