

Digitalização semi-automatizada de dados na produção de Modelos Numéricos de Elevação

LUCIANO VALENTIM RECHIUTI

CTA - Centro Técnico Aeroespacial
IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço
12225 São José dos Campos, SP, Brasil

Abstract. This paper presents a method for the semi-automated production of Digital Elevation Models through the raster digitization of isoline maps using low cost desktop scanners and microcomputers. The process begins with an evaluation of the scanner geometric accuracy, followed by the processes of raster digitization, segmentation, thinning, edition, vectorization, labeling, coordinate transformations, and an evaluation of the process accuracy. After these operations, a vectorial archive of the isolines is achieved. This archive can be stored and handled in Geographic Information Systems and Digital Cartographic Data Bases, in order to provide data for terrain modeling systems.

1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, as características topográficas da superfície terrestre têm sido objeto de numerosos estudos, visando determinar métodos práticos de armazenamento de dados e modelagem de feições em computadores.

Essa modelagem de feições tem sido executada de forma bastante eficiente, através dos Modelos Numéricos de Terreno (MNT). Os MNT's representam distribuição espacial das características de um terreno sobre a superfície terrestre. Quando se deseja modelar a altimetria de um terreno, esse modelo é denominado Modelo Numérico de Elevação (MNE).

Considerando as inúmeras aplicações de MNE's, destacam-se aquelas que podem ser usadas em combinação com imagens digitais. Essas aplicações constituem uma poderosa ferramenta para o Sensoriamento Remoto, possibilitando a correção geométrica de imagens de satélites, a correção radiométrica de imagens multiespectrais, e a integração do MNE e imagem em transformação do tipo IHS (Intensity-Hue-Saturation). Além dessas aplicações, os MNE's também possibilitam a produção automatizada de ortomagens e a simulação de terrenos através de iluminação ou sombreamento sintético.

Com o surgimento da Cartografia Assistida por Computador e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), começaram também ser construídas as primeiras bases digitais de dados altimétricos. Nessas bases de dados, os MNE's (também denominados Modelos Digitais de Elevação - MDE) são representados por curvas de nível ou por um conjunto de pontos cotados. Utilizando os MNE's, é

possível a obtenção de informações relevantes sobre a superfície terrestre sem a necessidade de se trabalhar diretamente na superfície real.

O MNE é gerado de um conjunto de amostras obtidas a partir de uma superfície real. A aquisição ou amostragem dos dados pode ser realizada por vários métodos. Atualmente, essa aquisição é executada principalmente através da digitalização manual de cartas topográficas, por meio de mesas digitalizadoras. Esse procedimento é bastante comum no Brasil e em outros países onde ainda não foi efetivamente implementada a cartografia automatizada, ou em países onde ainda não existem bases de dados cartográficos digitais.

A digitalização manual é um processo tedioso e sujeito a imprecisões, que consome bastante tempo de operadores e máquinas, com custos consideráveis. Uma solução que vem sendo adotada por várias instituições públicas e privadas em todo o mundo é a digitalização através de "scanners" ou Dispositivos Imageadores por Varredura (DIV's). Os DIV's permitem a aquisição de dados para MNE's a partir da digitalização semi-automatizada de mapas topográficos, diminuindo tempo e os custos, e ainda aumentando a precisão do processo.

Tendo em vista todas as limitações impostas pela digitalização manual, o objetivo deste trabalho é apresentar um método para a produção semi-automatizada de Modelos Numéricos de Elevação (MNE's) a partir de DIV's de baixo custo e microcomputadores. Uma vez comprovada sua eficiência, este método deverá servir como base para a implantação de um sistema de digitalização semi-automatizada no Instituto de Aeronáutica e Espaço -

IAE, pertencente ao Centro Técnico Aeroespacial - CTA.

2 Modelos Numéricos de Elevação: generalidades

O MNE é gerado a partir de um conjunto de pontos $((X_i, Y_i, Z_i), i = (1, \dots, n))$, amostrados a partir de uma superfície real. As coordenadas X e Y dos pontos estão relacionadas às posições de amostragem na superfície, e as coordenadas Z representam os valores atribuídos à altimetria do terreno que se quer modelar.

É comum encontrar na literatura de língua inglesa vários termos similares a MNE's. De acordo com [Aronoff (1989)], os termos mais comumente usados são "Digital Terrain Model" (DTM), "Digital Terrain Data" (DTD), "Digital Elevation Model" (DEM), e "Digital Terrain Elevation Data" (DTED). Ao longo deste trabalho, o termo adotado será Modelo Numérico de Elevação (MNE).

2.1 Operações básicas para modelagem digital de terrenos

Segundo [Pettinati (1983)], o processo de modelagem de uma superfície utilizando computadores é composto por três fases:

- 1) coleta (ou aquisição) de informações que caracterizem o comportamento da superfície;
- 2) elaboração de um modelo matemático composto por estruturas de dados e funções de interpolação que simulem o comportamento da superfície;
- 3) utilização do modelo em substituição à superfície original.

2.2 Aquisição de dados

Como já foi citado anteriormente, a aquisição de dados para modelagem digital de superfícies consiste na amostragem de um conjunto de pontos $((X_i, Y_i, Z_i), i = (1, \dots, n))$, que representarão a superfície real que será modelada.

[Felgueiras et al. (1987)] afirmam que o processo de aquisição é determinante na qualidade do modelo final da superfície. Um modelo, por mais sofisticado que seja, não pode compensar os erros introduzidos por uma amostragem mal feita.

Existem várias formas de amostragem de dados na fase aquisição. Segundo [Doyle (1978)], os dados de MNE's podem ser obtidos através de:

- 1) levantamentos em campo;
- 2) medidas fotogramétricas em modelos estereoscópicos;

3) altímetros transportados por aviões ou satélites;

4) digitalização de mapas.

3 Materiais e métodos

3.1 Avaliação da qualidade geométrica de DIV's

Antes de iniciar a digitalização semi-automatizada de dados para produção de Modelos Numéricos de Elevação, é fundamental que se faça uma análise da precisão geométrica dos DIV's envolvidos. Esta análise é importante em um trabalho deste tipo, pois pretende-se desenvolver um sistema que seja operacional e principalmente confiável (em termos cartográficos).

Avaliar geometricamente a imagem produzida por um DIV significa compará-la a um padrão previamente escolhido. Segundo [d'Alge (1987)], uma das possibilidades de implementação da avaliação consiste no estabelecimento de uma transformação isogonal ou de similaridade entre os sistemas de coordenadas que representam a geometria do produto a ser avaliado e a do padrão. Isto se justifica pelo fato desta transformação não introduzir deformações, pois seus parâmetros são: (1) um fator de escala global; (2) uma rotação; e (3) duas translações. Pode-se ainda, usar uma transformação afim ortogonal com a finalidade de verificar a existência de erros que possam ser absorvidos por fatores de escala diferentes em direções ortogonais.

Neste processo, deverão ser avaliados os DIV's HP ScanJet Plus e o EIKONIX EC850, ambos de propriedade do IAE/CTA. Em uma situação ideal, o material a ser utilizado como documento base (padrão) deveria ser uma placa rígida de cristal ("reseau"), contendo uma rede de pontos de coordenadas calibradas (pontos de controle).

Assim, conhecendo-se o conjunto de coordenadas calibradas (x, y) dos pontos de controle no "reseau", e as correspondentes coordenadas na imagem em termos de colunas e linhas (C, L) , pode-se então estabelecer uma transformação de similaridade entre ambos os conjuntos.

Após o ajustamento por mínimos quadrados da transformação de similaridade acima citada, são obtidos os resíduos ao longo dos eixos x e y para cada um dos pontos de controle. Para uma análise mais completa do comportamento geométrico desses DIV's, os vetores dos resíduos do ajustamento podem ser plotados em papel, em uma escala previamente arbitrada.

Com base nos resultados obtidos, será possível verificar se esses DIV's atendem às especificações exigidas em trabalhos cartográficos (em termos de precisão geométrica).

3.2 Preparação dos documentos analógicos

No caso do sistema proposto, as informações de interesse (curvas de nível) poderão ser obtidas a partir de uma cópia em positivo do plástico de gravação mecânica ou da juntada sépia, relativas à carta que será objeto do trabalho. O plástico para gravação mecânica é um plástico estável constituído de uma base coberta por uma película que permite a gravação de traços nítidos por meio de instrumentos apropriados. A gravação das curvas de nível retira a película, permitindo a passagem de luz e fazendo com que o plástico funcione como um negativo fotográfico (este plástico é também conhecido por "scribe"). A juntada é resultado da operação fotográfica que reúne em um só positivo (ou negativo), todo o material referente a uma determinada cor, sendo que a juntada sépia corresponde à altimetria da carta (curvas de nível, cotas e pontos cotados).

Independentemente do tipo de original cartográfico que será utilizado, seja ele o plástico para gravação mecânica das curvas de nível ou a juntada sépia, a cópia em positivo desses documentos deverá conter apenas as entidades geométricas de interesse (curvas) contrastadas em relação ao fundo. Todas as informações textuais e simbólicas devem ser eliminadas, uma vez que, após a *rasterização*, as mesmas se tornarão ruídos, pois o sistema não prevê um módulo de reconhecimento de símbolos e caracteres.

Devido à maior facilidade de obtenção, será utilizado o positivo da juntada sépia de uma carta topográfica de escala 1:50.000, onde além das curvas de nível, constam também os pontos de cotas não confirmadas.

Um desenhista poderá, com facilidade e rapidez, eliminar os pontos cotados e opcionalmente fechar as curvas de nível nos lugares onde haviam cotas. Este trabalho de "fechamento" das curvas de nível não é muito custoso em termos de tempo dispendido, já que nas cartas topográficas apenas as curvas mestras e suplementares são cotadas.

Em princípio, o sistema permitirá apenas a entrada de dados provenientes de cartas construídas na projeção UTM, nas escalas de 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000.

Ainda nesta fase, devem ser manualmente superpostas e registradas as juntadas preta e sépia, a fim de que todos os pontos de cruzamento da grade UTM possam ser marcados na juntada sépia. Esses pontos terão a função de auxiliar no processo de transformação de coordenadas, que será abordado no item 3.9. A juntada preta é aquela que contém a toponímia, simbologia e cotas de pontos comprovadas no terreno, além das informações marginais da carta, coordenadas geográficas, quadriculado UTM, etc.

Todos esses trabalhos preparativos são de suma importância, pois quanto menor for o tempo gasto na fase de edição final dos dados obtidos, menor será o custo final do processo, já que os gastos com equipamentos são insignificantes antes da *rasterização*.

3.3 Digitalização raster ou rasterização

O DIV que realizará a conversão dos dados analógicos para um formato digital será o HP ScanJet Plus. Este DIV de baixo custo (preço aproximado de US\$ 1.500,00) pode "rasterizar" documentos em papel ou transparência, com uma resolução espacial máxima de 300 ppp, e com resolução radiométrica de 2, 16 ou 256 níveis de cinza. Sendo um "desktop scanner" ("scanner" de mesa), suas dimensões reduzidas permitem apenas a acomodação de documentos de tamanho A4 (210 mm x 297 mm) ou menores.

Neste trabalho será utilizada uma cópia em positivo da juntada sépia de uma carta topográfica na escala 1:50.000, editada pela DSG ou IBGE, com dimensões aproximadas de 500 mm x 500 mm. Devido aos limites de acomodação de formatos do DIV, será *rasterizada* apenas uma parte desse original cartográfico, correspondente ao tamanho A4. A área da carta selecionada para *rasterização* deverá corresponder a uma região de relevo bastante movimentado, com uma alta densidade de curvas de nível e com um afastamento muito pequeno entre curvas contíguas. Além disso, deverão aparecer também nesta área curvas intermediárias interrompidas e curvas intermediárias unidas, com o objetivo de avaliar-se o trabalho de edição.

Também serão digitalizadas áreas do mesmo tamanho (A4) com diferentes densidades (média e baixa) de curvas de nível, a fim de testar-se a eficiência da digitalização semi-automatizada em comparação aos métodos tradicionais utilizando mesas digitalizadoras.

É importante ainda considerar que em um ambiente operacional, o fator "acomodação de formato"

é fundamental para o sucesso do sistema, uma vez que qualquer original cartográfico pode ser *rasterizado* de uma só vez.

Entretanto, este fator limitante não invalida o presente trabalho, uma vez que os procedimentos aqui descritos podem ser estendidos para a digitalização semi-automatizada de documentos de quaisquer tamanhos.

Caso o DIV EIKONIX modelo EC850, também pertencente ao CTA/IAE, esteja disponível durante o período de realização do trabalho, o mesmo será utilizado em substituição ao HP ScanJet Plus. Esta troca se justifica pelo fato de que o DIV EIKONIX pode acomodar documentos de aproximadamente 60 cm x 60 cm, permitindo assim a avaliação do uso do sistema em um ambiente operacional.

Para o processamento e visualização dos dados será utilizado um microcomputador do tipo PC/AT 386 33 MHz, com 4Mbytes de RAM e 80 Mbytes de disco rígido, além de uma placa e um monitor colorido SuperVGA. Este sistema permite que imagens digitais com dimensões de até 1024 x 768 pixels, sejam visualizadas no monitor sem nenhum tipo de amostragem.

Para selecionar a resolução espacial adequada, deve ser levado em conta o menor detalhe a ser digitalizado.

Segundo as normas elaboradas pelo [Ministério do Exército (1975)], nas cartas em escalas de 1:250.000 e maiores, as curvas de nível mestras são representadas com uma espessura de 0.01 polegada (0.25 mm), e as curvas de nível intermediárias como uma espessura de 0.005 polegada (0.13 mm). As curvas de nível suplementares são executadas em traços interrompidos, com a mesma espessura das curvas intermediárias.

Desta forma, considerando que na folha de curvas de nível (juntada sépia), o traço mais fino é de 0.13 mm, a resolução espacial deverá ser de 0.065 mm (390 ppp). Como o menor afastamento entre duas linhas contíguas é de 0.1 mm, a resolução espacial ideal deverá ser 0.05 mm (508 ppp). Se esse limite não for respeitado, após a *rasterização* algumas linhas poderão apresentar ligações entre si, e poderão também surgir discontinuidades ao longo das curvas digitalizadas. Esses efeitos devem ser evitados, pois os mesmos podem causar grandes prejuízos ao processamento dos dados.

No processo de *rasterização* será adotada a resolução espacial máxima do DIV HP ScanJet Plus, que é de 300 ppp (0.084 mm). Apesar desse valor ser bem menor do que o valor da resolução espacial ideal (508 ppp), testes prévios demonstraram que neste caso é possível utilizar-se a resolução de 300 ppp com bons resultados, embora isto possa acarretar um maior trabalho de edição dos dados. A possibilidade de uso desta resolução se deve ao fato de que o positivo da juntada sépia possui uma qualidade muito boa, e se deve também à alta resolução radiométrica do DIV utilizado (256 níveis de cinza).

Após a *rasterização* de uma parte da juntada sépia, equivalente ao tamanho A4, será gerado um arquivo digital da ordem de 9 Mbytes. Devido a sua considerável extensão, este arquivo deverá ser comprimido para fins de armazenamento.

3.4 Módulo de segmentação

Nesta etapa, será realizada a binarização da imagem, com a finalidade de selecionar e separar as informações.

Em princípio, a seleção do limiar será feita por intervenção direta do operador. Partindo do histograma da imagem, o operador poderá selecionar um limiar observando no monitor o valor que apresenta melhor resposta após a binarização.

Uma vez terminado esse processo, a informação estará separada do fundo, restando na imagem apenas os níveis de cinza "0" e "1". O valor "1" (preto) estará associado à informação, e o valor "0" (branco) estará associado ao fundo.

3.5 Módulo de afinamento

As operações de afinamento das curvas de nível são pré-requisitos para o processo de vetorização, e têm a finalidade de afinar os dados lineares até que os mesmos atinjam uma espessura unitária. Assim, após essas operações, as curvas de nível terão a espessura máxima de um *pixel*, que deve representar de forma fiel a posição do centro da linha.

Baseando-se no trabalho de [Sanchez (1990)], será implementado o algoritmo de [Zhang e Suen (1984)], modificado pelo algoritmo de [Chen e Hsu (1989)].

O algoritmo de [Zhang e Suen (1984)] realiza o afinamento através de operações locais, analisando a vizinhança-oito de cada elemento da imagem binária

que contém informação (nível de cinza 1), utilizando para isso uma máscara 3 x 3 (Figura 3.1).

P_9 $P_{(i-1, j-1)}$	P_2 $P_{(i-1, j)}$	P_3 $P_{(i-1, j+1)}$
P_8 $P_{(i, j-1)}$	P_1 $P_{(i, j)}$	P_4 $P_{(i, j+1)}$
P_7 $P_{(i+1, j-1)}$	P_6 $P_{(i+1, j)}$	P_5 $P_{(i+1, j+1)}$

Fig. 3.1 - Designação dos 9 pixels da janela 3 x 3.
FONTE: Sanchez (1990), p.57.

O processo é iterativo, e termina quando todas as linhas estiverem afinadas. Com a finalidade de manter a conexidade das linhas, cada iteração é dividida em duas subiterações.

Na primeira subiteração, o ponto examinado (P_1) só é eliminado da imagem se forem satisfeitas as seguintes condições:

$$(a) 2 \leq B(P_1) \leq 7$$

$$(b) A(P_1) = 1 :$$

$$(c) P_2 * P_4 * P_6 = 0$$

$$(d) P_4 * P_6 * P_8 = 0$$

$$(e) A(P_1) = 2 :$$

$$(f) P_2 * P_4 = 1 \text{ e } P_6 + P_7 + P_8 = 0$$

$$(g) P_4 * P_6 = 1 \text{ e } P_2 + P_8 + P_9 = 0$$

onde $A(P_1)$ é o número de padrões 0→1 (mudança de nível de cinza 0 para 1) encontrados ao se percorrer em ordem o conjunto $P_2, P_3, P_4, \dots, P_8, P_9$, que são os oito vizinhos de P_1 . $B(P_1)$ é o número de vizinhos de P_1 diferentes de zero, que é dado por:

$$B(P_1) = \sum_{n=2}^9 P_n, P_n \neq 0$$

Na segunda subiteração, somente as condições (c), (d), (f) e (g) são substituídas pelas seguintes:

$$(c') P_2 * P_4 * P_8 = 0$$

$$(d') P_2 * P_6 * P_8 = 0$$

$$(f') P_2 * P_8 = 1 \text{ e } P_4 + P_5 + P_6 = 0$$

$$(g') P_6 * P_8 = 1 \text{ e } P_2 + P_3 + P_4 = 0$$

permanecendo as demais sem alteração.

Segundo [Sanchez (1990)], esta versão modificada do algoritmo de [Zhang e Suen (1984)] preserva os méritos do original e supera os deméritos, como o não afinamento completo das linhas e o encurtamento ou deterioração das outras.

Este algoritmo será implementado em linguagem C num ambiente PC/AT 386. Eventuais correções que devam ser feitas na imagem após o afinamento, poderão ser realizadas através do módulo de edição.

3.6 Módulo de edição

O módulo de edição de dados tem como objetivo a remoção de ruídos, as operações de preenchimento e a redução de dados.

Como a imagem binarizada e afinada ainda encontra-se no formato "raster", torna-se fácil a construção de um programa de computador que execute as operações de preenchimento e a redução de dados.

Caso a edição manual de dados (realizada antes da *rasterização*) ou as operações de afinamento não tenham sido totalmente eficientes, o operador terá a chance de realizar o preenchimento das linhas que ficaram desconectadas.

A redução de dados pode também ser necessária para eliminar símbolos, caracteres ou ruídos indesejáveis que por ventura tenham permanecido na imagem.

Tanto as operações de preenchimento como a redução de dados serão, em princípio, realizadas manualmente pelo operador através do cursor da tela do monitor. O princípio básico do funcionamento do programa consiste em posicionar o cursor no local desejado e trocar o valor do *pixel* para "1" (preenchimento) ou "0" (redução de dados).

Nesse ponto é que se nota a importância da preparação cuidadosa dos documentos analógicos.

Quanto mais criteriosa for essa preparação, menores serão os esforços dedicados à edição dos dados.

Quanto à remoção de ruídos, será construída uma outra pequena rotina que realizará a eliminação de *pixels* ou grupos de *pixels* que não possuam conexão. Essa rotina é totalmente automática e seu princípio de funcionamento consiste no deslocamento de uma máscara 3 x 3 sobre a imagem afinada, linha a linha. Em cada *pixel* que contém informação é analisada a vizinhança-oito com o objetivo de detectar *pixels* que não possuam conexão ou que estejam formando blocos isolados.

3.7 Módulo de vetorização

A fim de realizar a conversão "raster-vector" dos dados, serão levados em consideração os dois métodos citados por Peuquet (1981): a extração ao longo da varredura ("map scanning") e a extração por arcos ("line following").

No trabalho de Sanchez (1990), a vetorização dos dados é realizada através do método de extração de arcos. Este método apresenta bons resultados, entretanto ele é mais lento que o método de extração ao longo da varredura, pois exige a presença de um operador para posicionar o cursor em cada arco que será vetorizado. Ao operador cabe também a tarefa de rotular cada arco extraído, desperdiçando tempo e tornando o processo mais sujeito a erros.

A proposta deste trabalho é realizar a conversão "raster-vector" por um método misto, que engloba ambos os métodos já citados.

Visando diminuir a interferência do operador no processo de vetorização e rotulagem das curvas de nível, estas etapas serão executadas separadamente.

A vetorização dos dados terá início com uma varredura que começará pelo *pixel* situado na extrema esquerda da primeira linha da imagem. A varredura é executada linha a linha, e cada vez que é encontrado um ponto (*pixel*) com informação (nível de cinza "1"), o sistema passa a perseguir a isolinha até o seu final. Como a imagem está binarizada e afinada, a perseguição da linha é realizada através da análise da vizinhança-oito de cada *pixel* da isolinha. A cada *pixel* de coordenadas de imagem (L, C) detectado, são atribuídas as coordenadas vetoriais (X, Y) do ponto correspondente. Ao mesmo tempo que cada *pixel* é detectado, o valor do nível de cinza do mesmo é trocado de "1" para "0", eliminando-se da imagem os *pixels* já

vetorizados. A perseguição termina quando se chega ao final da isolinha. Como resultado, será obtida uma tabela que conterá o nome do elemento (por exemplo, CURVA 1), o número de pontos do elemento, e o "spagucte" das coordenadas (X, Y) dos pontos.

Uma vez terminado o processamento da primeira isolinha, o cursor retorna à posição inicial do primeiro *pixel* com informação encontrado (localizado, neste caso, na primeira linha da imagem), e continua a varredura até encontrar um outro *pixel* com informação. Quando isso ocorrer, o processo citado no parágrafo anterior é executado novamente (perseguição da isolinha). Esta sequência de ações se repete até que todas as isolinhas da imagem estejam vetorizadas.

Com o objetivo de reduzir o número de pontos que serão gravados em cada isolinha, será realizada uma seleção durante a extração dos arcos, de modo que em qualquer uma das oito direções principais os pontos alinhados serão representados apenas pelos seus extremos.

3.8 Módulo de rotulagem

Depois que todas as isolinhas estiverem editadas e vetorizadas, parte-se então para a rotulagem das mesmas. Este processo consiste na atribuição de altitudes a cada uma das isolinhas, gerando-se assim um arquivo digital de isolinhas que representa um Modelo Numérico de Elevação.

O método de rotulagem que será implementado baseia-se no trabalho de [Leberl e Olson (1982)]. Ao invés de se rotular cada isolinha separadamente, utiliza-se uma linha reta auxiliar na tela do monitor para a rotulagem de blocos ou conjuntos de isolinhas.

Partindo-se das isolinhas vetorizadas visualizadas na tela do monitor, plota-se com o cursor os dois pontos (inicial e final) que definirão o comprimento e a posição da reta auxiliar em relação a um conjunto de isolinhas. Em seguida, as isolinhas interceptadas de menor e maior valor de altitude são rotuladas manualmente, informando-se também ao módulo a equidistância entre as isolinhas. A partir disso, as isolinhas intermediárias que estão interceptadas pela reta auxiliar são rotuladas automaticamente. Cada isolinha rotulada recebe uma nova cor na tela, facilitando assim o controle do operador sobre o processo. Terminando a rotulagem do primeiro conjunto de isolinhas, procede-se da mesma forma para os demais.

Neste módulo, também haverá a possibilidade de rotular isolinhas individuais, posicionando-se o cursor sob a isolinha e entrando com a altitude via teclado. Isto possibilitará a rotulagem de isolinhas isoladas, e também de isolinhas suplementares.

3.9 Módulo de transformação de coordenadas

Este módulo tem a função de relacionar o arquivo vetorial gerado com o sistema de coordenadas do mapa utilizado como original cartográfico, além de minimizar os erros geométricos da *rasterização*.

Em princípio, os pontos de cruzamento da grade UTM do mapa seriam transportados manualmente para a juntada sépia antes da *rasterização*. Isto seria realizado através da superposição das juntadas sépia e preta, uma vez que a grade UTM encontra-se nesta última. A superposição das juntadas permitiria que os pontos de cruzamento fossem marcados na juntada sépia, de modo que após a *rasterização* estes pontos aparecessem como *pixels* isolados ou como grupos de *pixels* na imagem.

Procede-se então a leitura das coordenadas linha e coluna (L, C) desses pontos na imagem, com o auxílio do cursor na tela do monitor. Depois da leitura das coordenadas (L, C) de cada ponto, entra-se com as respectivas coordenadas UTM (N, E) via teclado. À medida que vão sendo adquiridos, todos estes dados vão sendo armazenados em um arquivo digital.

O próximo passo será relacionar as coordenadas (L, C) com (N, E) através de funções polinomiais. Serão implementados quatro tipos de polinômios: afim, bilinear, segundo grau e terceiro grau. Esses polinômios são definidos pelos seguintes modelos matemáticos:

a) Transformação afim:

$$E = a_0 + a_1 * C + a_2 * L$$

$$N = b_0 + b_1 * C + b_2 * L$$

b) Polinômio bilinear:

$$E = a_0 + a_1 * C + a_2 * L + a_3 * C * L$$

$$N = b_0 + b_1 * C + b_2 * L + b_3 * C * L$$

c) Polinômio de 2º grau:

$$E = a_0 + a_1 * C + a_2 * L + a_3 * C * L + a_4 * C^2 + a_5 * L^2$$

$$N = b_0 + b_1 * C + b_2 * L + b_3 * C * L + b_4 * C^2 + b_5 * L^2$$

d) Polinômio de 3º grau:

$$E = a_0 + a_1 * C + a_2 * L + a_3 * C * L + a_4 * C^2 + a_5 * L^2 + a_6 * C^2 * L + a_7 * C * L^2 + a_8 * C^3 + a_9 * L^3$$

$$N = b_0 + b_1 * C + b_2 * L + b_3 * C * L + b_4 * C^2 + b_5 * L^2 + b_6 * C^2 * L + b_7 * C * L^2 + b_8 * C^3 + b_9 * L^3$$

onde

E, N: coordenadas UTM (extraídas da carta original);

C, L : coordenadas da imagem (coluna, linha);

a_i, b_i : parâmetros de transformação a serem calculados através de um ajustamento paramétrico, com $i=1,2,3,\dots,9$.

Para gerar-se um mapeamento de grau r , devem existir no mínimo $(r+1)(r+2)/2$ pontos de controle. Assim, para o polinômio afim são necessários 3 pontos; para o polinômio de 2º grau, 6 pontos; e para o polinômio de 3º grau, 10 pontos. No caso do polinômio bilinear, são necessários 4 pontos de controle.

Entretanto, para que os sistemas de equações de mapeamento possam ser ajustados através do Método dos Mínimos Quadrados, o número de pontos de controle utilizados para cada tipo de polinômio deve ser superior ao número mínimo necessário.

O operador terá a opção de escolher quais os pontos de controle que serão utilizados no ajustamento. Em função do número de pontos escolhidos, o sistema ou o operador seleciona os polinômios de resolução possível e calcula os resultados. Se o operador gerar as equações de mapeamento com o número mínimo de pontos de controle, tem-se um sistema de equações exato, e portanto os erros relativos aos pontos utilizados serão nulos. Caso contrário, as equações serão resolvidas por mínimos quadrados, resultando geralmente resíduos e erros médios quadráticos diferentes de zero.

Para cada polinômio calculado, o sistema informará os resíduos em N e E para cada um dos pontos utilizados no ajustamento, bem como o erro médio quadrático (EMQ) ao longo dos eixos N e E, e o EMQ resultante.

O operador poderá repetir esses cálculos quantas vezes forem necessárias, selecionando quais pontos de

controle serão ou não utilizados, até que o mapeamento atinja uma precisão aceitável.

Feito isto, o operador poderá então escolher qual dos polinômios será utilizado na geração do arquivo digital de saída, analisando o EMQ ao longo dos eixos E e N para cada polinômio. Esta escolha também poderá ser realizada automaticamente, deixando-se que o sistema analise o EMQ para cada um dos polinômios, e determine a melhor opção.

Escolhido o melhor polinômio, pode-se então gerar o arquivo de saída. Partindo-se do polinômio escolhido, cujos parâmetros já foram determinados pelo ajustamento dos pontos de controle, o arquivo de saída é gerado aplicando o polinômio no arquivo de dados de entrada. Com o objetivo de diminuir o tempo de processamento dos dados, as transformações polinomiais serão aplicadas apenas no arquivo de dados vetoriais. Caso os polinômios fossem aplicados ao longo da imagem, o tempo exigido seria muito grande, uma vez que seriam necessárias duas operações de cálculo para cada *pixel*: uma interpolação para calcular a posição de cada *pixel* na imagem de saída (transformação de coordenadas) e uma interpolação para determinar os níveis de cinza correspondentes aos respectivos *pixels* na imagem de saída (reamostragem).

No presente trabalho, a operação de transformação de coordenadas consistirá apenas na interpolação das novas posições dos pontos (X, Y) no arquivo vetorial de saída, a partir do arquivo vetorial original de isolinhas. Isto será realizado substituindo os valores das coordenadas (X, Y) de cada ponto do arquivo vetorial de isolinhas original no polinômio escolhido, cujos coeficientes (parâmetros) já foram previamente calculados.

Ao final destas operações, obter-se-á um arquivo vetorial geocodificado de isolinhas, ou seja, um arquivo cujos pontos estarão relacionados ao sistema de coordenadas do mapa utilizado como original cartográfico. Ao mesmo tempo, os erros geométricos oriundos da *rasterização* estarão determinados e minimizados.

Este arquivo poderá ser armazenado e manipulado em Bancos de Dados Cartográficos Digitais e Sistemas de Informação Geográficas, alimentando sistemas de modelagem de terrenos.

3.10 Avaliação da precisão do processo

Considerando o modelo polinomial utilizado para o mapeamento (geocodificação), a precisão do processo de *rasterização* de mapas de isolinhas pode ser avaliada através da análise dos erros médios quadráticos (EMQ) ao longo dos eixos X (colunas) e Y (linhas), e do EMQ resultante.

Entretanto, caso tenham sido introduzidos erros nas etapas de binarização, afinamento e vetorização, os valores acima não serão verdadeiros para todo o arquivo vetorial de isolinhas. Em função disso, estas isolinhas poderão estar deslocadas em relação à posição planimétrica "verdadeira" no original cartográfico.

Uma maneira simples de verificação consiste na plotagem em papel rígido do arquivo de isolinhas (na mesma escala do original cartográfico), e na sobreposição desses dois documentos. Desta forma, poderiam ser avaliados os possíveis deslocamentos das isolinhas digitalizadas em relação à posição original.

Para complementar a avaliação da precisão do processo, as isolinhas do original seriam digitalizadas em uma mesa digitalizadora convencional através do Sistema Geográfico de Informações - SGI, e o resultado também seria plotado e sobreposto ao original cartográfico e ao documento gerado pela plotagem das isolinhas *rasterizadas*.

4 Considerações finais

Conforme foi demonstrado, a automação do processo de digitalização de mapas de curvas de nível alivia o operador da tarefa repetitiva, tediosa e sujeita a imprecisões da digitalização manual, além de reduzir o tempo e os custos exigidos no processo de produção de MNE's.

Todas essas vantagens acima citadas revertem em benefícios ao Sensoriamento Remoto, já que esta tecnologia utiliza várias aplicações de MNE's em combinação com imagens digitais. Outra tecnologia que também se beneficia são os Sistemas de Informações Geográficas, viabilizando assim a geração de MNE's de maneira mais eficiente.

Ao longo deste trabalho, foram descritas todas as etapas da digitalização semi-automatizada de dados, e foi proposta uma metodologia para a produção de Modelos Numéricos de Elevação a partir desses dados.

Na verdade, existem ainda alguns obstáculos a serem transpostos no processo de digitalização semi-automatizada. Entretanto, como trata-se de um tema bastante debatido atualmente, a cada dia surgem novas propostas para otimizar os resultados obtidos, e tentativas para solucionar algumas restrições ainda existentes.

Referências bibliográficas

- Aronoff, S. Geographic information systems: a management perspective. Ottawa, WDL, 1989. 294p.
- Chen, Y.S.; Hsu, W.H. A systematic approach for designing 2-subcycle and pseudo 1-subcycle parallel thinning algorithms. Pattern Recognition, 22(3):267-282, 1989.
- d'Alge, J.C.L. Qualidade geométrica de imagens TM do LANDSAT-5. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 13., Gramado, 1987. Anais. Gramado, SBC, 1987.
- Doyle, F.J. Digital terrain model: an overview. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44(12):1481-1485, Dec. 1978.
- Felgueiras, C.A. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores. (Tese de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. 243p. (INPE-4406-TDL/303).
- Leberl, F.W.; Olson, D. Raster scanning for operational digitizing of graphical data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(4):615-627, Apr. 1982.
- Ministério do Exército. Manual Técnico T34-700: Convenções Cartográficas (1ª Parte: Normas para o emprego dos símbolos). Ministério do Exército. 1975. 55 p.
- Pettinati, F. Modelamento digital e representação gráfica de superfícies. (Tese de Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1983.
- Peuquet, D. An examination of techniques for reformatting digital cartographic data / part 1: the raster-to-vector process. Cartographica, 18(1):35-48, 1981.
- Sanchez, P.L. Avaliação e especificação de metodologia para um sistema de aquisição semi-automática de documentos cartográficos. (Tese de Mestrado em Sistemas e Computação) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1990. 82 p.
- Zhang, T.Y. Suen, C.Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. Communications of the ACM, 27(3):236-242, March 1984.