

PROPOSTA DE UM NOVO MÉTODO DE AMOSTRAGEM PARA MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Walker Gomes
Instituto de Atividades Espaciais
Centro Técnico Aeroespacial
12225 São José dos Campos, SP
BRASIL

L. A. Vieira Dias
Instituto de Pesquisas Espaciais
Secretaria Especial de Ciencia e Tecnologia
Caixa Postal 515
12201 São José dos Campos, SP
BRASIL

RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor um método para melhorar a precisão dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), quando se tem como fonte de dados cartas topográficas. A convicção de que um ponto crítico para precisão destes modelos é a fase de regularização da grade, levou a um estudo que permitisse entender os erros gerados nesta fase. Este método faz uma verificação das amostras escolhidas para cada ponto de grade interpolado. Se os dados amostrados não forem representativos existe um algoritmo que, automaticamente, escolhe novas amostras. Nas situações mais simples uma interpolação linear é utilizada e nas mais complicadas utiliza-se o interpolador cúbico de Akima. Após a regularização da grade utilizou-se o interpolador bicúbico de Akima para densificação da malha. Os resultados iniciais mostraram um excelente desempenho, tanto em velocidade como em precisão, quando comparado com o método convencional.

ABSTRACT

The aim of this work is to improve the precision of the Digital Elevation Models, with the topographic maps as data source. The regularization of the grid was considered a critical point for improving the model. The errors generated in this phase were studied. The Geographic Information System developed by INPE was used and a new methodology for regularization of the grid is shown considering that linear interpolation presents good results, provided that good samples are obtained. It was observed that the quality of the models is strongly associated to the sampling process, an algorithm was performed to select representative sample. Models with high precision were obtained.

1. INTRODUÇÃO

É claro que não existe um método de interpolação perfeito e a precisão necessária será função da finalidade do modelo. Enquanto, para algumas aplicações o modelo gerado pode ser excelente, para outras, pode ser inadequado ou, até mesmo, inútil.

Durante este estudo percebeu-se que o refinamento de grade realizado pelo método de seleção dos vizinhos mais próximos por quadrante (INPE, 1987), apresentava alguns erros, tais como: Achatamento de picos e vales, modificações nas declividades, as quais chamou-se de

efeito degrau, entre outros. Para maiores detalhes ver Gomes, W. 1989.

Os erros acima citados podem não ser significativos para muitas aplicações mas certamente serão bastante importantes para aplicações que necessitem de informações de declividade.

Na primeira parte desta pesquisa fez-se um estudo de interpoladores que melhor se adaptassem ao processo de refinamento de grade. Apesar deste estudo ter apresentado alguns bons resultados, percebeu-se que o ponto crítico,

para precisão do modelo, é a fase de regularização da grade. Isto deve-se ao fato de ser feita, nesta fase, a primeira interpolação usada no modelo. Se esta não for boa, os erros irão propagar-se pelas próximas fases. Percebeu-se que os erros provenientes do processo de amostragem afetam o desempenho do interpolador.

Desta forma procurou-se uma forma de medir a qualidade das amostras. Quando as amostras se mostram impróprias, um mecanismo de procura por melhores amostras é acionado. Os interpoladores também são selecionados de acordo com as características dos pontos amostrados.

Para se colocar em prática o novo método utilizou-se como "software" básico o Sistema de Informações Geográfico desenvolvido pelo INPE e conhecido pela sigla SGI. Para os testes de desempenho comparativo utilizou-se também o SGI. Este utiliza um método convencional de aquisição de dados baseado nas interpolações pelo vizinho mais próximo, o qual foi utilizado para comparações com o método proposto.

2. TIPOS DE ERRO

Em termos gerais, pode-se dividir os erros, provenientes da regularização de grade, em duas grandes classes, as quais batizamos de erro tipo 1 e erro tipo 2.

a) Erro tipo 1

Este tipo de erro ocorre quando o algoritmo de seleção de amostras escolhe dados não representativos, apesar deles existirem. A Figura 1 mostra um exemplo onde a amostragem, utilizando o método vizinho mais próximo por quadrante, apenas encontra amostras da isolinha de 100 metros (pontos A, B, C, D), sendo que visualmente se percebe que uma interpolação, usando os pontos 1 e 2, seria muito mais eficiente.

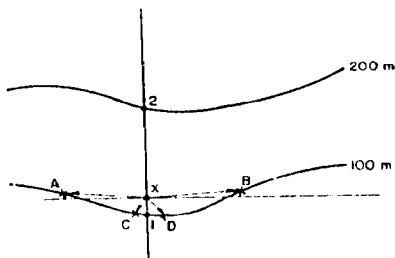
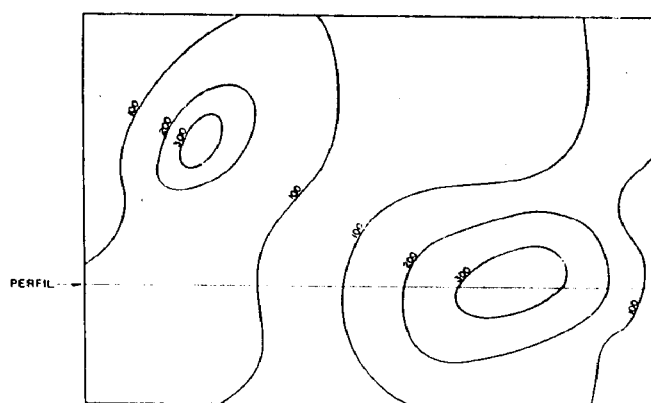


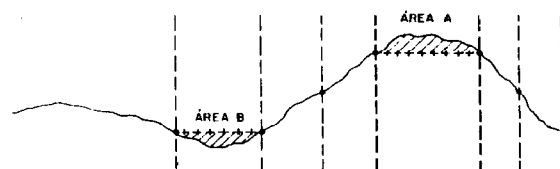
Figura 1 - Erro tipo 1.

b) Erro tipo 2

Ao contrário do erro tipo 1, este tipo de erro não é causado pelo algoritmo de escolha das amostras, mas sim porque a carta não possui boas amostras na região de ocorrência destes erros. A Figura 2 mostra um exemplo onde na área A (região de pico) e na região B (região de vale) qualquer amostra, escolhida pelo método do vizinho mais próximo, encontrará amostras iguais, o que ocasionará um achatamento de picos e vales.



(a)



(b)

Figura 2 - Erro tipo 2

3. MÉTODO PROPOSTO

Para sanar ou atenuar estes erros, propõe-se a metodologia que se segue, a qual dividimos, por motivos didáticos, em dois módulos. O primeiro é o de aquisição de dados e, o segundo, o de seleção de amostras e interpoladores em função de uma análise dos pontos amostrados.

3.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS (Módulo 1)

A técnica para aquisição dos dados segue a seguinte metodologia:

a) Determinação da grade ótima de amostragem calculando-se a menor distância entre duas isolinhas, tanto no sentido norte/sul quanto no sentido leste/oeste (Gomes, W. 1989).

b) Desenho desta grade ótima numa folha transparente. Na prática, utiliza-se papel quadriculado transparente, o qual pode se adaptar a um valor bem próximo da grade ótima, ao mesmo tempo que se evita o trabalho de se desenhar uma nova grade para cada modelo.

c) A grade obtida no item anterior é sobreposta e registrada sobre o mapa.

d) O operador inicia pela primeira linha horizontal ($y = 1$) e insere no computador (por meio de mesa digitalizadora ou pelo teclado, arquivo 1), o valor de "x" e "z" nas intersecções desta linha com todas as curvas de nível, numa forma ordenada da esquerda para a direita (Figura 3). Esta ordenação tem duas finalidades: A primeira, com a intenção de armazenar os dados numa forma que simplifique o trabalho de encontrar os vizinhos, otimizando o esforço computacional. A segunda, para facilitar o controle por parte da pessoa que executa a introdução dos dados no computador, diminuindo-se a probabilidade de se inserir um ponto duas vezes ou então, deixar de introduzir algum ponto.

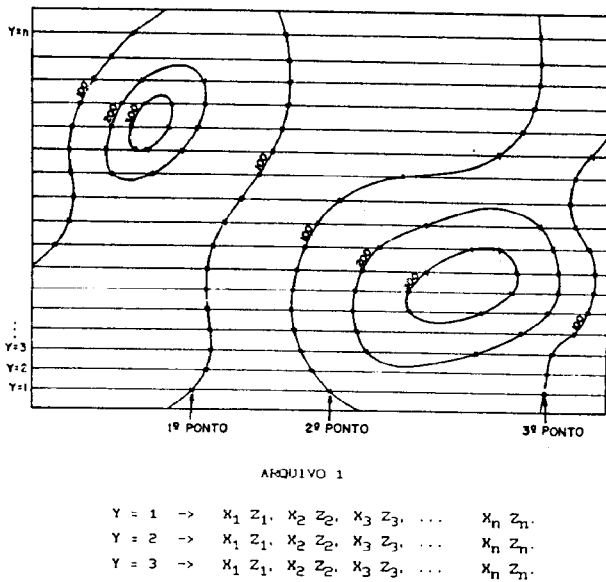


Figura 3 - Amostragem formando grade semi-regular em y.

e) Repete-se o procedimento, descrito em "d", com as linhas seguintes obedecendo a ordem crescente, com $y = 2, y = 3, \dots, y = n$.

f) Repete-se os procedimentos "d" e "e", fixando x ao invés de y e colocando os dados no arquivo 2 (Figura 4).

g) Visualizam-se as amostras dos arquivos 1 e 2 ao mesmo tempo (Figura 5). A intersecção das duas grades forma uma malha regular sendo que as amostras, necessárias para estimar estes pontos, estarão organizadas sobre as linhas em

x ou y. Neste tipo de amostragem o interpolador percebe as tendências em relação a quatro direções (Figura 6).

Nota-se que os pontos vizinhos ao ponto "m" são facilmente localizados. Para isto basta procurar, no arquivo 1, os pontos imediatamente maior e menor que "m", respectivamente "3" e "2" na Figura 6, e no arquivo 2 os pontos "4" e "1".

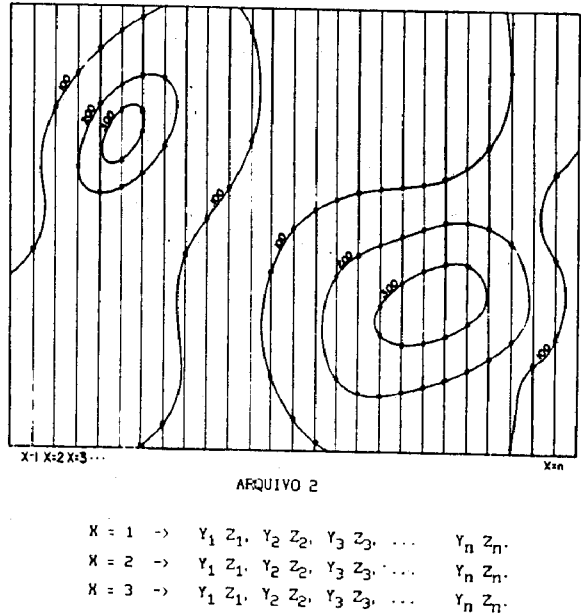


Figura 4 - Amostragem formando grade semi-regular em x.

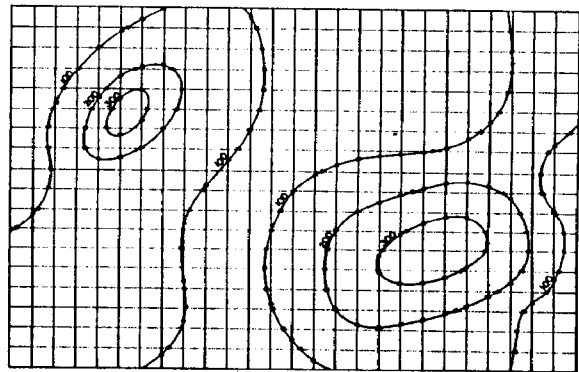


Figura 5 - Sobreposição das Figuras 3 e 4.

Nota-se também que esta estrutura de dados (o fato de se ter dados alinhados) permite a utilização de interpoladores mais potentes. Como exemplo, poder-se-ia citar os interpoladores cúbicos (Foley e Van Dam, 1982; Akima, 1970), da forma:

$$z = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d$$

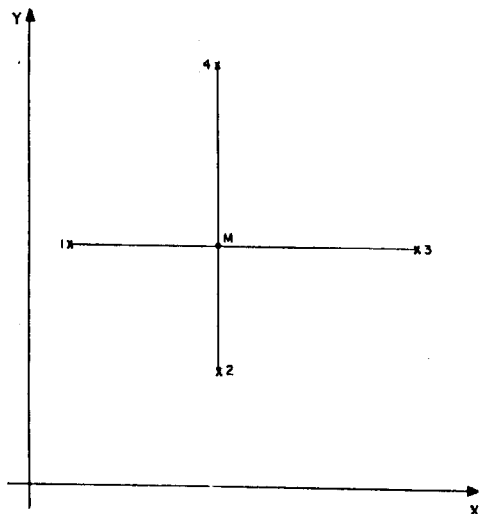


Figura 6 - Quatro pontos para estimar o ponto de grade

3.2 AMOSTRAGEM E INTERPOLAÇÃO (MÓDULO 2)

A principal virtude do método de aquisição de dados proposto é que o comportamento das amostras sobre os interpoladores é transparente e, portanto, previsível, permitindo manipulação na escolha das amostras de forma a selecionar aquelas realmente representativas.

Outra qualidade muito importante, que advém da previsibilidade e facilidade de manipulação, é a possibilidade de utilização de interpoladores diferentes, dependendo da região que estiver sendo interpolada. Estas características serão exploradas a seguir.

3.3 HIPÓTESES DE ERRO E SOLUÇÕES POSSÍVEIS

A idéia é utilizar, um interpolador linear (baixo tempo computacional) nas regiões em que apresenta bons resultados. Nas regiões de erro tipo 1, investir numa procura de melhores amostras pois, como mostrado anteriormente, o problema destas áreas é de amostragem e não do interpolador. Nas regiões de ocorrência de erros tipo 2, utilizar o interpolador cúbico de Akima pois, nestas regiões, a utilização de interpolação linear provocaria um achatamento de picos e vales.

Utilizando-se o método proposto chega-se a três hipóteses:

a) Caso 1

Os pontos amostrados possuem as seguintes características: Dois pontos com cota igual a Z_1 e dois pontos com cota Z_2 (Figura 7).

Nota-se que os pontos 1 e 4 possuem a mesma cota de 200 m, enquanto os pontos 2 e 3 possuem cota de 300 m.

Neste caso, mede-se a distância (dx) do ponto 1 ao ponto 3, e a distância (dy) do ponto

2 ao ponto 4. O interpolador utilizará apenas dois pontos. Se a distância dx for menor que dy, utiliza-se os pontos 1 e 3. Caso contrário utiliza-se os pontos 2 e 4.

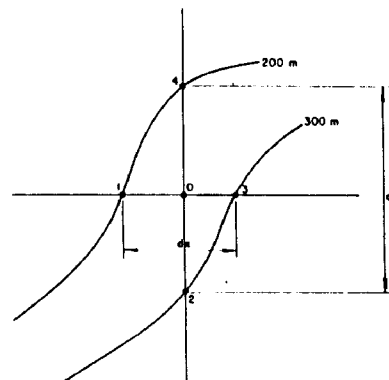


Fig. 7 - Amostras caso 1.

b) Caso 2

Os pontos amostrados possuem as seguintes características: Três pontos com cota Z_1 e um ponto com cota Z_2 , ou vice versa (Figura 8).

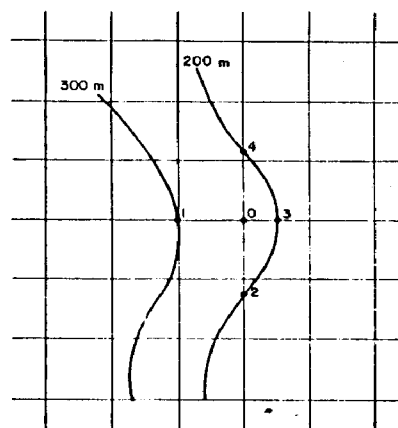


Fig. 8 - Amostras caso 2.

Nota-se, no exemplo da Figura 8, que os pontos 2, 3 e 4 possuem a mesma cota (200 m), enquanto o ponto 1 possui uma cota diferente (300 m). Para evitar que a isolinha de 200 m tenha um peso maior que a isolinha de 300 m, utiliza-se, na interpolação, apenas o ponto de cota diferente, no caso, o ponto 1 e o ponto diametralmente oposto, no exemplo, o ponto 3.

c) Caso 3

Os quatro pontos possuem cotas iguais.

Neste caso, duas situações podem ocorrer: Área semi-fechada, onde ocorre erro do tipo 1 (pontos de grade 1, 2 e 3 da Figura 9), ou área fechada, onde ocorre erro do tipo 2 (pontos A, B e C).

O problema das áreas semi-fechadas, onde ocorre erro tipo 1, será discutido em 3.4 e, o problema das áreas fechadas, onde ocorre erro tipo 2, será discutido em 3.5.

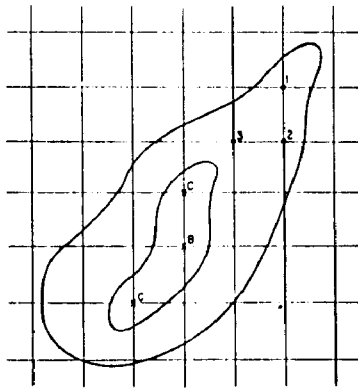


Fig. 9 - Amostras caso 3.

3.4 - SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA ERRO DO TIPO 1

Nas áreas semi-fechadas, o método de amostragem foi ineficiente, pois as amostras não são representativas (erro tipo 1). Nos testes efetuados, estas regiões apresentaram os maiores erros, não no número de ocorrências, mas na dimensão do erro. Portanto, este é um problema que precisa ser resolvido ou atenuado.

Para atacar este problema pensou-se em duas saídas:

a) Abordagem generalista

Esta abordagem parte do princípio que o método de amostragem ainda não é eficiente e que, para sanar este problema, há necessidade de se ampliar o processo de amostragem. Neste espírito uma saída seria, no processo de amostragem proposto, amostrar-se também nas diagonais. Este processo, sem dúvida, deve trazer uma melhora nestas regiões. No entanto, este processo mostrou-se muito caro, pois aumenta em muito o tempo de confecção do modelo, não só pelo aumento do esforço computacional mas, principalmente, pela duplicação do processo de amostragem, justamente a parte mais desgastante e demorada do método. Além disto, é necessário desenvolver um algoritmo para aproveitar convenientemente estas informações. Saliencia-se também que, apesar de diminuir bastante a probabilidade de erro tipo 1, ainda assim é possível a ocorrência deste tipo de erro. A Figura 10

mostra que, mesmo numa amostragem por octante, existe a possibilidade de se ter uma amostragem falha. Devido a estes problemas, esta abordagem foi descartada.

b) Abordagem local

A idéia desta abordagem é utilizar a característica das regiões passíveis de erro (amostras com cotas iguais) para separá-las das regiões bem comportadas. Desta forma se utiliza um esforço extra apenas nas áreas problema. Nos experimentos realizados percebeu-se que a probabilidade de se ter amostras iguais (caso 3) é menor que dez por cento. Portanto, mais de noventa por cento dos pontos de grade, a serem interpolados, podem ser resolvidos de uma forma simples e rápida, como descrito nos Itens 3.3a e 3.3b.

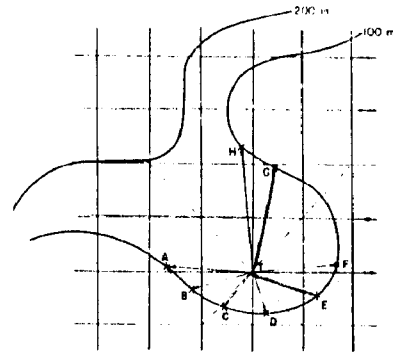


Figura 10 - Procura por octante.

Esta abordagem parte do princípio que a amostragem é ruim apenas nestas áreas e que uma procura por melhores amostras para estas regiões pode resolver o problema. Caso se encontre uma amostra mais representativa, esta é utilizada. Caso contrário, é considerado que este ponto de grade está numa área fechada e, portanto, sujeito a erro do tipo 2.

Vislumbram-se duas maneiras de se efetuar a procura de amostras mais representativas:

1) Manual

Ao se deparar com quatro amostras iguais o algoritmo interrompe o processo, indica na tela o ponto de grade a ser interpolado e solicita ao operador identificar se esta é uma área fechada (erro tipo 2) ou área semi-fechada (erro tipo 1). Caso ele informe que o problema é do tipo 2, o algoritmo segue para resolver este tipo de problema como será abordado no Item 3.5. Se o problema for do tipo 1, o operador será convocado a pegar, por meio de um "mouse", duas amostras. A Figura 11 mostra que os pontos A e B são mais representativos que os pontos 1, 2, 3 e 4. A partir daí, o algoritmo utiliza estes dois pontos na interpolação e continua o processo até encontrar outro ponto com cotas iguais - onde, novamente, o operador será chamado a intervir - ou não encontrando, finalizando o processo.

Vantagens desta técnica:

- Menor esforço computacional e, principalmente, menor esforço na etapa de amostragem quando comparado com a abordagem generalista.
- Amostragens manuais para pontos específicos são muito representativas. Difícilmente se consegue amostras tão boas de forma totalmente automática. Para se chegar próximo a esta qualidade de amostras há necessidade de algoritmos cada vez mais sofisticados, com um custo computacional crescente.

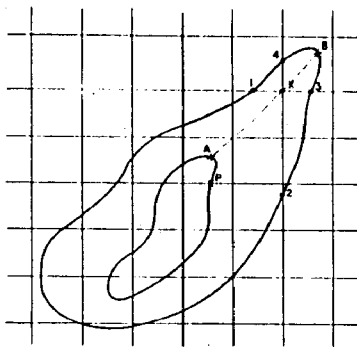


Fig. 11 - Amostragem Manual.

Desvantagens deste processo:

- Não é totalmente automático, necessitando da presença e, algumas vezes, interferência do operador durante todo o processo.

2) Automática

Neste caso, ao se deparar com amostras iguais, o algoritmo faz uma busca nos pontos vizinhos a procura de uma amostra representativa (cota diferente). Caso consiga encontrar, este ponto e mais o ponto oposto são levados ao interpolador.

Pensou-se em várias formas para este algoritmo de procura. A forma desenvolvida para este trabalho segue a seguinte metodologia:

Na tentativa de encontrar algum ponto de cota diferente, procura-se no eixo Y constante (Figura 12), o ponto de grade anterior ("A") e posterior ("B") e, a partir destes pontos de grade, procura-se, no eixo X constante, o ponto imediatamente maior ("A2") para a grade anterior e ("B2") para a grade posterior e o ponto imediatamente menor ("A1") para a grade anterior e ("B1") para a grade posterior. Caso o ponto seja encontrado (no exemplo da Figura 12a o ponto "A2" é encontrado), esta rotina termina, levando este ponto ao interpolador. O interpolador utilizará este ponto e o diametralmente oposto (ponto 2), como no caso 2,

discutido em 3.3b. Caso não encontre nenhum valor diferente, o mesmo procedimento é feito em relação ao eixo X constante. No exemplo da Figura 12a, nota-se que, na primeira iteração, quando se desloca a grade no eixo X constante, o algoritmo encontra os pontos "A1", "A2", "B1", "B2", os quais possuem a mesma cota. Ao se executar o deslocamento da grade no eixo X constante, amostra-se os pontos "A'1", "A'2", "B'1", "B'2" e o ponto "B'1" terá um valor de cota diferente. Portanto, esta rotina leva os pontos "3" e "B'1" para o interpolador.

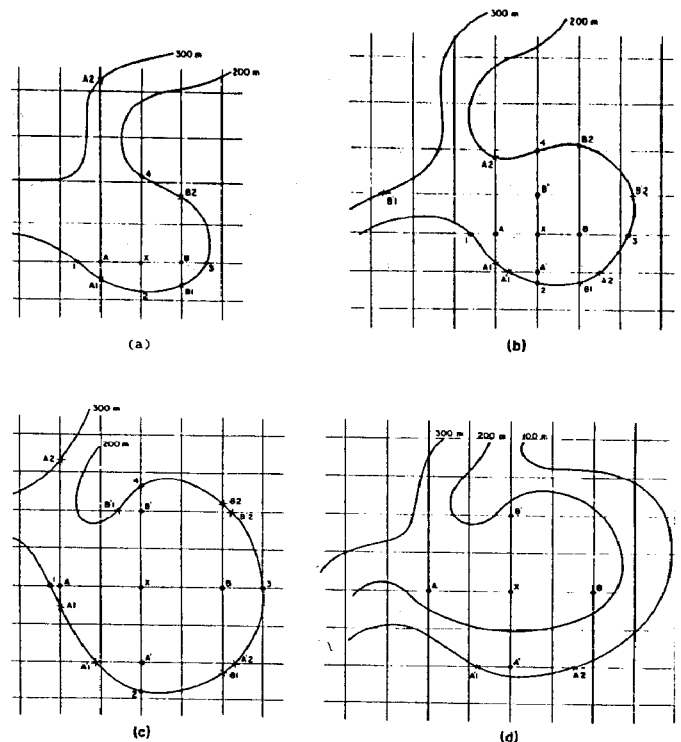


Fig. 12 - Algoritmo de procura.

- (a) Deslocamento no sentido y constante.
- (b) Deslocamento no sentido x constante.
- (c) Segunda iteração.
- (d) Mecanismo de proteção.

Caso não se encontre nenhum ponto com cota diferente nesta primeira iteração, a rotina anterior é repetida, com a diferença que os pontos de grade, "A" e "B", e "A'" e "B'", são deslocados de mais uma unidade de grade, como ilustrado na Figura 12c. Neste caso, percebe-se que nesta iteração encontra-se o ponto "A2" com valor de cota diferente.

Se, nesta iteração, não se encontra ponto de cota diferente, inicia-se uma nova iteração, agora com os pontos "A" e "B", e "A'" e "B'" espaçados de três unidades do ponto de grade desejado. Daí em diante, o processo segue com o mesmo raciocínio até que se encontre uma amostra diferente ou, então, até que o mecanismo de proteção (será explicado no próximo parágrafo) tenha sido acionado em todas as direções de procura.

Um cuidado necessário é evitar que, ao se deslocar o ponto de grade para os pontos "A", "A'", "B" e "B'", se cruze a isolinha já encontrada. Se isto acontecer os pontos, oriundos da ramificação (no exemplo da Figura 12d os pontos "A'1" e "A'2" são ramificados de "A'"), não são considerados.

Nem sempre estas amostras são as ideais, no entanto, mesmo assim, melhoram muito o modelo final. Na Figura 13 tem-se um exemplo onde as amostras ideais seriam "Z" e "W", no entanto os pontos "3" e "B'1", selecionados pelo algoritmo, pouco diferem quanto ao resultado da interpolação.

Este algoritmo de procura não é perfeito. Em alguns casos, o algoritmo não consegue encontrar um ponto da isolinha procurada. Neste caso, esta área é considerada como se fosse uma área fechada, onde o algoritmo para regiões de erro tipo 2 (será discutido na seção 3.5) atenuará este problema de amostragem.

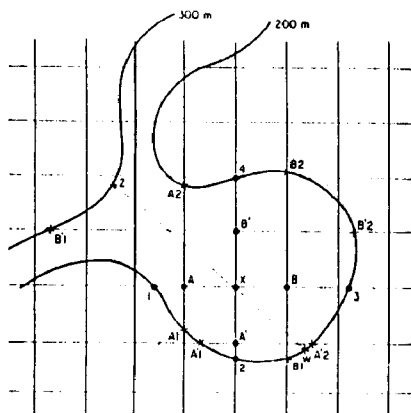


Fig. 13 - Amostras obtidas pelo algoritmo de procura.

3.5 SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA ERRO DO TIPO 2

Como visto anteriormente, os erros do tipo 2 ocorrem em áreas fechadas e, neste caso, não existem amostras melhores. Qualquer que seja a amostra escolhida, os resultados serão os mesmos (quatro cotas idênticas).

Nestas regiões, há necessidade de um interpolador que utilize as informações de declividade. O método de interpolação de Akima (Akima, 1970) atenua bastante estes problemas.

Numa feliz coincidência, estas áreas não resolvíveis pelos interpoladores ponderados pela distância, apresentam ótima amostragem para o método de Akima. Nota-se, na Figura 14, que qualquer que seja o sentido de interpolação (X constante ou Y constante) as amostras dos pontos 2 e 3 serão obrigatoriamente diferentes. O mesmo acontece com os pontos 4 e 5. Esta é a

melhor situação para o desempenho do interpolador de Akima (Gomes, W. 1989).

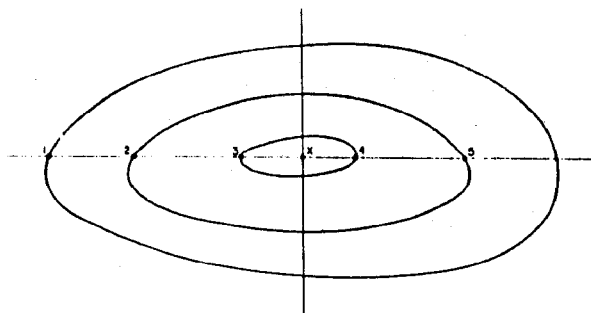


Fig. 14 - Amostragem para o interpolador cúbico de Akima em área fechada.

3.6 REGULARIZAÇÃO DA GRADE

Para regularização da grade utilizou-se o interpolador bicúbico de Akima (Akima, 1974a/b), já disponível no SGI, o qual apresentou um bom desempenho.

4. AVALIAÇÃO DO MÉTODO

Objetivo:

- 1) Avaliar o desempenho matemático do método proposto em relação a métodos convencionais. Como método convencional utilizou-se o método implantado no SGI, o qual utiliza o método de vizinhos mais próximos por quadrante.

Método:

- 1) Utilizou-se uma grade regular, fornecida pela DSG (Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro), como verdade terrestre. Esta grade foi gerada por restituição fotogramétrica dos pares estereoscópicos utilizados na confecção da carta (DSG, 1987).
- 2) Fez-se uma regularização de grade pelo método convencional.
- 3) Fez-se uma regularização de grade pelo método proposto.
- 4) Fez-se uma análise estatística dos dados gerados pelo método convencional quando comparado com os dados considerados verdadeiros.
- 5) Fez-se uma análise estatística dos dados gerados pelo método proposto quando comparado com os dados considerados verdadeiros.

Resultados:

a) O teste estatístico do método convencional mostrou os seguintes resultados:

- Erro médio quadrático :	595,01
- Erro médio :	19,65
- Desvio Padrão :	15,22
- Variância :	231,53
- Erro máximo :	39,84

b) O teste estatístico do método proposto mostrou os seguintes resultados:

- Erro médio quadrático :	218,85
- Erro médio :	11,87
- Desvio Padrão :	8,83
- Variância :	77,92
- Erro máximo :	29,29

Análise:

O método proposto mostrou um melhor desempenho estatístico em todos os parâmetros analisados. Cabe salientar que foi escolhido, para este teste, o modelo convencional (disponível no SGI) que mostrou o menor erro médio quadrático. Portanto, pode-se concluir que o método proposto apresenta um excelente potencial para confecção de grades mais precisas a um baixo custo computacional.

5. CONCLUSÃO

Os trabalhos publicados sobre o assunto apresentam, em sua maioria, uma abordagem generalista para encontrar um meio de amostragem e interpolação que, na média, apresente bons resultados. Isto tem provocado uma dicotomia. Quando se utiliza métodos mais simples (tempo computacional menor) o erro médio tem sido grande e o aspecto visual muitas vezes ruim. Quando se utiliza métodos mais complexos tem-se enfrentado dois problemas graves:

- 1) Os interpoladores mais potentes necessitam de um maior número de amostras. Se por um lado isto pode ser bom, pois o peso de uma amostra ruim fica mais diluído, por outro aumenta a probabilidade de se ter amostras ruins.
- 2) Aumento da carga computacional, não só para os cálculos de interpolação, mas também para prever possíveis oscilações do interpolador.

A grande descoberta deste trabalho parece ser a capacidade de se prever os erros possíveis. Este fato, que de início parecia inviável, permitiu a criação de uma metodologia para sanar ou atenuar estes erros utilizando mecanismos de avaliação e seleção de amostras, bem como através da escolha do interpolador, dependendo das características da região a ser interpolada.

Os resultados iniciais mostraram que o método proposto apresenta um grande potencial para confecção de modelos de forma rápida e precisa. No entanto, acredita-se que o método necessita ser mais exaustivamente testado para que confirme estes resultados iniciais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, tenham contribuído para a realização deste trabalho e, de forma especial, ao Analista de Sistemas João Camilo da Silva pela implementação ou adaptação de programas que tornaram viáveis muitos dos testes práticos, os quais foram fundamentais para que as hipóteses formuladas se confirmassem ou gerassem novas idéias.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKIMA, H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM*, 17(4):589-602, Oct. 1970.
- Method of bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures. *Communications of the ACM*, 17(1):18-20, Jan. 1974a.
- Algorithm 474 bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures. *Communications of the ACM*, 17(1):26-31, Jan. 1974b.
- DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). *Carta topográfica*, Folhas 2745/3, Vila Militar, Rio de Janeiro, 1987.
- FOLEY, J.D.; VAN DAM, A. *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*. Reading, MA, Addison Wesley, 1982.
- GOMES, W. *Amostragem e Interpolações em Modelos Digitais de Terreno*. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais - São José dos Campos. Apresentada em dezembro de 1989, atualmente em fase de publicação.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) *Sistema de Informações Geográficas. Versão 1.0*, Manual do Usuário, São José dos Campos, 1987.